UNIVERSIDADE DE SOROCABA
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO E ASSUNTOS ESTUDANTIS
ENGENHARIA ELÉTRICA

FELIPE RIBEIRO MORENO SOTO

ANÁLISE TÉCNICA DE SUBSTITUIÇÃO DE CUBÍCULOS DE MÉDIA TENSÃO

Sorocaba/SP
2025

FELIPE RIBEIRO MORENO SOTO

ANÁLISE TÉCNICA DE SUBSTITUIÇÃO DE CUBÍCULOS DE MÉDIA TENSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência parcial para obtenção do Diploma de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade de Sorocaba.

Orientador: Prof. Dr. Denicezar Angelo Baldo

Sorocaba/SP
2025

FELIPE RIBEIRO MORENO SOTO

ANÁLISE TÉCNICA DE SUBSTITUIÇÃO DE CUBÍCULOS DE MÉDIA TENSÃO

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como requisito parcial para obtenção do Diploma de Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade de Sorocaba.

Aprovado em:

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Denicezar Angelo Baldo
Universidade de Sorocaba

Prof. Me. Osvaldo Ribeiro Martins Parreira
Universidade de Sorocaba

AGRADECIMENTOS

Expresso minha profunda gratidão aos meus pais, Luciano e Patrícia, pelo amor incondicional, apoio constante e por sempre acreditarem no meu potencial. Nada disso seria possível sem o exemplo de dedicação, força e caráter que me ensinaram ao longo da vida.

Aos meus avós, que partiram antes de eu concluir esta etapa, deixo todo o meu amor e gratidão. A saudade permanece, mas também permanece tudo o que me ensinaram e tudo o que representaram na minha vida. Cada avanço e cada vitória carregam um pouco deles, e dedico este trabalho à memória que guardo com tanto carinho.

Por fim, deixo meu reconhecimento à instituição e a todos os profissionais que contribuíram para minha formação, ajudando a construir não apenas o meu conhecimento técnico, mas também a minha trajetória pessoal e profissional.

“É justo que muito custe o que muito vale”
(Santa Teresa D’Ávila)

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo analisar a substituição de cubículos de média tensão de 6,6 kV em um ambiente industrial, com foco na melhoria da confiabilidade, segurança e eficiência operacional. Inicialmente, foi realizado o diagnóstico detalhado do sistema elétrico original, considerando o levantamento técnico, o diagrama unifilar, avaliação de risco do arco elétrico e conformidade normativa segundo NR-10, NBR 14039, NBR IEC 62271-200 e NBR 17227. A partir dessa análise, foram identificados pontos críticos relacionados à obsolescência de equipamentos, falhas de proteção, riscos de arco interno e não conformidade normativa, justificando a necessidade de modernização. Foram definidos requisitos técnicos, normativos, de automação e integração, além de critérios de operação segura e manutenção. O projeto de substituição incluiu planejamento detalhado, aquisição de cubículos e equipamentos modernos, instalação, passagem e conexão de cabos, integração de relés de proteção, nobreaks e sistemas de medição, com comissionamento e testes de desempenho. Estudos de coordenação e seletividade de proteções, análise de arco elétrico e confiabilidade foram conduzidos para validar a solução implementada. Os resultados demonstraram redução significativa de riscos elétricos, aumento da disponibilidade e confiabilidade do sistema, adequação às normas técnicas vigentes e impactos econômicos positivos. A substituição também proporcionou melhorias operacionais, integração de sistemas de monitoramento e maior segurança para os operadores, evidenciando que a modernização de cubículos antigos é uma estratégia eficaz para garantir a continuidade da produção e a proteção de pessoas e equipamentos.

Palavras-chave: Proteção elétrica. Confiabilidade elétrica. Alta tensão.

ABSTRACT

The present work aims to analyze the replacement of 6.6 kV medium-voltage switchgear in an industrial environment, focusing on improving reliability, safety, and operational efficiency. Initially, a detailed diagnosis of the original electrical system was carried out, considering the technical survey, single-line diagram, arc flash risk assessment, and regulatory compliance according to NR-10, NBR 14039, NBR IEC 62271-200, and NBR 17227 standards. From this analysis, critical points were identified related to equipment obsolescence, protection failures, internal arc risks, and non-compliance with applicable standards, justifying the need for modernization. Technical, regulatory, automation, and integration requirements were defined, along with criteria for safe operation and maintenance. The replacement project included detailed planning, procurement of modern switchgear and equipment, installation, cable routing and connection, integration of protection relays, uninterruptible power supplies (UPS), and measurement systems, followed by commissioning and performance testing. Studies on protection coordination and selectivity, arc flash analysis, and reliability assessment were conducted to validate the implemented solution. The results demonstrated a significant reduction in electrical hazards, an increase in system availability and reliability, compliance with current technical standards, and positive economic impacts. The replacement also provided operational improvements, integration of monitoring systems, and enhanced operator safety, demonstrating that the modernization of outdated switchgear is an effective strategy to ensure production continuity and the protection of personnel and equipment.

Keywords: Electrical protection. Electrical reliability. High Voltage.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

kV	Quilovolt
NR	Norma regulamentadora
NBR	Norma Brasileira
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Institute Of Electrical and Eletronic Engineers
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IED	Intelligent Eletronic Device
TC	Transformador de corrente
TP	Transformador de potencial
SF6	Hexafluoreto de Enxofre
MTBF	Mean Time Between Failures
MTTR	Mean Time to Repair
EPI	Equipamento de proteção individual
PVO	Pequeno volume de óleo
IAC	Internal Arc Classification
LSC	Loss of servisse continuity
GOOSE	Generic Object Oriented Substation Event
VLAN	Virtual local area network
BF	Breaker Failure
REF	Feeder Protection and Control
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
IP	Indice de proteção

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10
2 CONTEXTO INDUSTRIAL 12
2.1 PROBLEMA E MOTIVAÇÃO 13
3 OBJETIVOS 15
3.1 OBJETIVO GERAL 15
3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO 15
4 METODOLOGIA 16
5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 18
5.1 FUNÇÃO DO CUBÍCULO DE MÉDIA TENSÃO NO SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL 18
5.2 TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS DOS CUBÍCULOS 19
5.3 SEGURANÇA ELÉTRICA E ARCO INTERNO 21
5.4 NORMAS E REQUISITOS LEGAIS 23
5.5 AUTOMAÇÃO E PROTEÇÃO 24
6 DIAGNÓSTICO DO SISTEMA ORIGINAL 25
6.1 LEVANTAMENTO TÉCNICO 25
6.2 DIAGRAMA UNIFILAR ORIGINAL 26
6.3 AVALIAÇÃO DE RISCO 27
6.4 CONFORMIDADE NORMATIVA 29
7 DEFINIÇÃO DE REQUISITOS PARA SUBSTITUIÇÃO 32
7.1 REQUISITOS TÉCNICOS E DE DESEMPENHO 32
7.2 REQUISITOS NORMATIVOS E DE SEGURANÇA 33
7.3 REQUISITOS DE AUTOMAÇÃO E INTEGRAÇÃO 34
7.4 REQUISITOS DE MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO SEGURA 35
8 EXECUÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO 39
8.1 PLANEJAMENTO E CRONOGRAMA DA INTERVENÇÃO 39
9 COMPARAÇÕES 42
9.1 COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE 42
9.2 PROTEÇÕES IMPLEMENTADAS 48
10 RESULTADOS OBTIDOS 50
10.1 SEGURANÇA 50
10.2 CONFIABILIDADE E DISPONIBILIDADE 50
10.3 CONFIGURAÇÃO DA NOVA CABINE 52
11 CONSIDERAÇÕES FINAIS 55
REFERÊNCIAS 57

1 INTRODUÇÃO

A operação segura e confiável de sistemas elétricos industriais é um dos pilares para a continuidade da produção, a preservação da integridade física dos colaboradores e a proteção dos ativos da empresa (BRASIL, 2019). Em ambientes industriais de grande porte, qualquer interrupção não planejada ou falha no fornecimento de energia elétrica pode resultar em impactos significativos, que vão desde perdas financeiras expressivas até riscos à vida humana e à integridade das instalações. Nesse contexto, a confiabilidade do sistema elétrico deixa de ser apenas um requisito técnico e passa a ser uma condição essencial para a sustentabilidade das operações e para a competitividade das organizações (ABNT, 2021).

Entre os diversos elementos que compõem esses sistemas, os cubículos de média tensão assumem papel central. Esses equipamentos são responsáveis por integrar funções vitais, como proteção, seccionamento, comando e monitoramento das redes elétricas, atuando como pontos estratégicos de distribuição e controle. Mais do que simples compartimentos metálicos, os cubículos concentram dispositivos de alta criticidade, como disjuntores, relés de proteção, transformadores de corrente e de potencial, que juntos formam a espinha dorsal da operação elétrica em nível de média tensão (MAMEDE FILHO, 2013). Assim, seu desempenho impacta diretamente a estabilidade da rede e a segurança dos trabalhadores.

No entanto, o avanço tecnológico e a evolução das normas de segurança e desempenho tornam os equipamentos de gerações passadas cada vez mais limitados diante das novas exigências do setor elétrico. Cubículos antigos, projetados em décadas anteriores, frequentemente apresentam lacunas significativas quando analisados sob a ótica atual, seja no que se refere à confiabilidade, à proteção contra arco interno ou à integração com sistemas digitais de supervisão e automação (ABNT, 2025). Dessa forma, a modernização ou a substituição desses equipamentos deixa de ser uma opção e se torna uma necessidade para manter a conformidade regulatória e assegurar a continuidade operacional.

A substituição de um cubículo de média tensão, entretanto, não se restringe ao simples ato de trocar um equipamento antigo por outro mais moderno. Trata-se de um processo complexo que envolve uma análise minuciosa de aspectos técnicos, operacionais, normativos e econômicos (ABNT, 2025). Cada etapa deve ser cuidadosamente planejada, desde a avaliação do sistema original até a definição dos

requisitos técnicos do novo conjunto, passando pela análise de riscos, estudos de seletividade e coordenação de proteções, além da avaliação dos impactos econômicos e dos benefícios esperados. Dessa forma, garante-se que o investimento realizado traga resultados efetivos em termos de segurança, confiabilidade, disponibilidade e custo-benefício (ABNT, 2025).

O presente trabalho tem como foco o estudo de caso da substituição de cubículos de média tensão de 6,6 kV em uma instalação industrial, tendo como objetivo analisar o sistema original, identificar os pontos críticos e estabelecer os requisitos necessários para a implantação de uma solução moderna. Busca-se, ainda, avaliar como a adoção de novos equipamentos impacta diretamente na confiabilidade do sistema, na segurança dos operadores e na otimização da operação industrial, considerando tanto os aspectos técnicos quanto os econômicos e de manutenção (BRASIL, 2019).

Além de descrever o processo de substituição, esta pesquisa pretende fornecer uma base técnica e metodológica que permita avaliar, de maneira objetiva, as melhorias obtidas. A intenção é que os resultados apresentados possam servir como referência para futuros projetos de modernização em ambientes industriais similares, contribuindo para a disseminação de práticas seguras e eficientes no setor elétrico (ABNT, 2025). Assim, a relevância do trabalho não se limita ao caso estudado, mas se amplia ao fornecer elementos que fundamentam decisões estratégicas relacionadas à gestão de sistemas elétricos industriais, reforçando a importância de investimentos direcionados à confiabilidade e à segurança das instalações.

2 CONTEXTO INDUSTRIAL

O setor industrial é altamente dependente da energia elétrica como insumo essencial para a continuidade das operações. Em processos produtivos de grande escala, como os encontrados em indústrias de mineração, siderurgia, papel e celulose, metalurgia e, particularmente, em plantas de transformação do alumínio, qualquer interrupção no fornecimento de energia pode representar perdas expressivas, tanto financeiras quanto operacionais. A confiabilidade e a segurança dos sistemas de distribuição interna, portanto, assumem papel determinante para a produtividade e para a competitividade da empresa (MAMEDE FILHO, 2013).

Nesse cenário, os sistemas de média tensão são responsáveis por alimentar transformadores e cargas críticas que suportam diretamente as linhas de produção. A falha de um cubículo, disjuntor ou sistema de proteção não apenas interrompe o fornecimento de energia, mas também pode gerar riscos elevados para os colaboradores e comprometer a integridade dos ativos (ABNT, 2021). Adicionalmente, a crescente complexidade dos processos industriais exige cada vez mais a integração da automação e da supervisão em tempo real, o que coloca novas demandas sobre a infraestrutura elétrica (O SETOR ELÉTRICO, 2022).

Outro aspecto relevante é que muitas indústrias brasileiras ainda operam com equipamentos instalados há várias décadas, projetados sob padrões técnicos que já não atendem às exigências normativas atuais. Cubículos de média tensão fabricados nos anos 1980 e 1990, por exemplo, não possuem soluções adequadas para mitigação de arco interno, não oferecem interface digital de comunicação e apresentam desgaste natural que aumenta a probabilidade de falhas (ABNT, 2025). Essa defasagem tecnológica resulta em maior risco operacional, elevação de custos com manutenção corretiva e menor eficiência energética (BRASIL, 2019).

No contexto atual, em que a busca por maior eficiência e segurança está alinhada a padrões internacionais de sustentabilidade e gestão de riscos, a modernização das instalações elétricas passa a ser considerada não apenas como uma necessidade técnica, mas como uma estratégia empresarial. Investimentos em novos cubículos de média tensão com maior nível de proteção, confiabilidade e integração digital permitem não apenas atender aos requisitos legais e normativos, mas também melhorar a competitividade da planta industrial ao reduzir tempos de parada, evitar acidentes e otimizar o gerenciamento energético (IEC, 2019).

Assim, compreender o contexto industrial é fundamental para analisar a substituição dos cubículos de média tensão. Mais do que uma simples troca de equipamentos, trata-se de uma decisão estratégica que impacta diretamente a produtividade, a segurança e a sustentabilidade da operação industrial (ABNT, 2025).

2.1 PROBLEMA E MOTIVAÇÃO

Os sistemas de alta tensão desempenham papel crítico na operação de indústrias de grande porte, devido à necessidade de fornecer energia confiável a processos contínuos e de alto consumo energético (MAMEDE FILHO, 2013; BRASIL, 2019). A confiabilidade desses sistemas está diretamente associada à integridade dos cubículos de distribuição, que atuam como pontos de seccionamento, proteção e manobra das linhas e equipamentos conectados à rede, garantindo a continuidade da produção e segurança dos operadores (ABNT, 2021; IEC, 2019).

Cubículos antigos, frequentemente projetados e fabricados há décadas, podem apresentar diversos problemas decorrentes de obsolescência, desgaste de componentes, isolamento comprometido e ausência de sistemas de proteção modernos (MAMEDE FILHO, 2013). Tais deficiências aumentam significativamente o risco de falhas, interrupções não planejadas e incidentes relacionados à segurança, como arcos elétricos internos e incêndio, que podem causar danos aos equipamentos e colocar em risco a integridade física dos operadores estando em desacordo com a NBR14039 item 4.1.2.

> A instalação elétrica deve estar disposta de maneira a excluir qualquer risco de incêndio de materiais inflamáveis devido a temperaturas elevadas ou arcos elétricos. Além disso, em serviço normal, as pessoas e os animais não devem correr riscos de queimaduras.

Além disso, normas nacionais e internacionais, como a NBR IEC 62271 - Equipamentos de Média Tensão, IEEE 1584 e a NR10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade estabelece requisitos claros para operação segura, manutenção e proteção desses equipamentos como no item 10.4.4 da NR10.

> As instalações elétricas devem ser mantidas em condições seguras de funcionamento e seus sistemas de proteção devem ser inspecionados e controlados periodicamente, de acordo com as regulamentações existentes e definições de projetos.

No entanto, cubículos antigos muitas vezes não atendem integralmente a essas normas, tornando necessária a substituição ou modernização para reduzir riscos e garantir a conformidade normativa.

Portanto, a substituição de um cubículo de 6,6 kV obsoleto representa não apenas uma melhoria operacional e de confiabilidade do sistema elétrico, mas também um avanço significativo em termos de segurança do trabalho (ABNT, 2025), mitigação de riscos de arco elétrico e adequação às normas técnicas vigentes. Este cenário justifica o presente estudo de caso, que analisa os impactos da modernização do equipamento na operação industrial.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

O presente estudo tem como objetivo analisar a substituição de cubículos de média tensão de 6,6 kV em um ambiente industrial, avaliando os ganhos obtidos em termos de confiabilidade, segurança e eficiência operacional, por meio de um estudo de caso baseado na implementação prática da nova solução.

3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Levantar as condições do cubículo antigo, incluindo aspectos técnicos, operacionais e de segurança;
- Identificar os riscos associados à manutenção e operação do equipamento obsoleto, com destaque para a possibilidade de ocorrência de arco elétrico;
- Descrever as características técnicas e operacionais do cubículo substituto, destacando melhorias em proteção, intertravamentos e integração com sistemas de supervisão;
- Avaliar impactos operacionais da substituição, incluindo redução de tempo de manutenção, paradas não programadas e conformidade normativa.

4 METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como um estudo de caso aplicado, baseado na substituição de cubículos de média tensão de 6,6 kV em um ambiente industrial. A abordagem adotada busca apresentar de forma detalhada o processo de análise, execução e avaliação dos resultados, considerando aspectos técnicos, operacionais, de confiabilidade e de segurança elétrica.

Inicialmente, foi realizado um levantamento documental e bibliográfico, contemplando normas técnicas nacionais e internacionais, como NR10, NBR IEC 62271 e IEEE 1584, além de manuais de fabricantes e literatura especializada sobre confiabilidade e segurança em cubículos de média tensão. Paralelamente, realizou-se o diagnóstico do cubículo antigo, por meio de inspeções físicas, identificação de riscos relacionados ao arco elétrico e verificação da conformidade com as normas vigentes como o item 5.3.4.1 da NBR14039 sobre dispositivos de proteção aplicados nos cubículos.

> Esses dispositivos de proteção devem poder interromper qualquer sobrecorrente menor ou igual à corrente de curto-circuito presumida no ponto em que o dispositivo está instalado. Tais dispositivos podem ser disjuntores acionados através de relés secundários com as funções 50 e 51, fase e neutro (onde é fornecido o neutro). Não são aceitos relés com princípio de funcionamento com retardo a líquido.

Em seguida, descreveu-se a solução implementada, detalhando as características do cubículo substituto, incluindo tipo de isolação, disjuntor, intertravamentos, integração com IEDs e sistemas de supervisão, bem como as medidas adotadas para aumentar a segurança e a confiabilidade operacional buscando a adequação a NR10 item 10.4.1.

> As instalações elétricas devem ser construídas, montadas, operadas, reformadas, ampliadas, reparadas e inspecionadas de forma a garantir a segurança e a saúde dos trabalhadores e dos usuários

A análise comparativa entre os cenários anterior e atual permitiu avaliar os ganhos obtidos, considerando indicadores de confiabilidade, disponibilidade e redução do risco de arco elétrico.

Por fim, foram avaliados os impactos econômicos e operacionais da substituição, considerando os custos de aquisição, instalação e manutenção, bem

como os benefícios gerados em termos de eficiência operacional e mitigação de riscos. A interpretação dos resultados foi confrontada com a fundamentação teórica, de modo a evidenciar os benefícios técnicos, normativos e de segurança proporcionados pela implementação do novo cubículo.

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

5.1 FUNÇÃO DO CUBÍCULO DE MÉDIA TENSÃO NO SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL

Os cubículos de média tensão desempenham papel central na distribuição de energia elétrica em ambientes industriais, atuando como elementos de seccionamento, proteção e controle das redes elétricas. Esses equipamentos possibilitam a conexão segura de transformadores, motores, painéis de distribuição e demais cargas críticas, garantindo a continuidade operacional de processos produtivos que dependem de fornecimento elétrico estável e confiável (MAMEDE FILHO, 2013).

Além de permitir o seccionamento das linhas, os cubículos oferecem proteção por meio de disjuntores e relés de proteção, prevenindo danos aos equipamentos e minimizando riscos de interrupção da produção. Também são utilizados para medição e monitoramento de grandezas elétricas, possibilitando diagnósticos e tomadas de decisão mais rápidas em caso de falhas (MAMEDE FILHO, 2013).

De acordo com João Mamede Filho (2013, p. 475), “Um painel elétrico genericamente compreende um conjunto de dispositivos de manobra associados a equipamentos de proteção, comando, medição e controle complementados por acessórios instalados internamente a um cubículo normalmente metálico dotado de estruturas de suporte” (MAMEDE FILHO, 2013).

A confiabilidade operacional do sistema elétrico industrial está diretamente relacionada à qualidade e manutenção desses cubículos. Um equipamento bem projetado e mantido não apenas assegura o fornecimento contínuo de energia, mas também reduz significativamente os riscos de acidentes elétricos, como arcos internos, que podem gerar danos materiais e riscos à integridade dos operadores (MAMEDE FILHO, 2013).

O cubículo de média tensão (conforme a figura 1) funciona como um ponto de controle estratégico dentro do sistema elétrico industrial, integrando funções de proteção, seccionamento, medição e supervisão, sendo essencial para a operação segura, confiável e eficiente da planta.

Figura 1 - Exemplos de cubículos em operação industrial.

Fonte: Elaboração Própria

5.2 TECNOLOGIA DE EQUIPAMENTOS DOS CUBÍCULOS

Os cubículos de média tensão reúnem diversos equipamentos que, em conjunto, garantem a proteção, o seccionamento e o monitoramento da rede elétrica industrial. Entre os principais componentes, destacam-se os disjuntores, relés de proteção, transformadores de corrente (TCs), transformadores de potencial (TPs), fusíveis, seccionadores e sistemas de automação integrados. Cada um desses elementos apresenta tecnologias específicas que influenciam diretamente na confiabilidade, segurança e operação do sistema (MAMEDE FILHO, 2013).

Os disjuntores são responsáveis pelo seccionamento automático ou manual da corrente elétrica em situações de falha, como sobrecorrente, curto-circuito ou arco interno. As tecnologias mais utilizadas incluem disjuntores a vácuo (conforme a figura 2) e a gás SF6, cada um com características próprias de capacidade de interrupção, durabilidade e manutenção. Os disjuntores modernos podem ser equipados com sensores e sistemas de monitoramento online, permitindo diagnósticos avançados e aumentando a confiabilidade do sistema (MAMEDE FILHO, 2013).

De acordo com João Mamede Filho (2013, p. 534), ” os disjuntores sempre devem ser instalados acompanhados da aplicação dos relés respectivos, que são os elementos responsáveis pela detecção das correntes, tensões, potência etc. do circuito que, após analisadas por sensores previamente ajustados, podem enviar ou não a ordem de comando para a sua abertura. Um disjuntor instalado sem os relés

correspondentes transforma-se apenas numa excelente chave de manobra, sem qualquer característica de proteção” (MAMEDE FILHO, 2013).

Figura 2 - Exemplo de disjuntor de média tensão.

Fonte: PWE ELÉTRICA. Disjuntores de média tensão. PWE Elétrica, 2025. Disponível em: https://pweeletrica.com.br/media-tensao/disjuntores-de-media-tensao-2/. Acesso em: 21 set. 2025.

Os relés de proteção (conforme a figura 3), incluindo dispositivos digitais e IEDs (Intelligent Electronic Devices), desempenham um papel fundamental na detecção de falhas e na atuação rápida dos disjuntores (MAMEDE FILHO, 2013). A tecnologia digital permite a configuração precisa de parâmetros, registro de eventos, comunicação com sistemas supervisórios via protocolos como IEC 61850 e integração com funções de automação, possibilitando diagnósticos remotos e estratégias de proteção mais sofisticadas.

Figura 3 - Exemplo de relé de proteção.

Fonte: ABB. Feeder protection and control REF615 IEC. ABB, 2025. Disponível em: https://new.abb.com/medium-voltage/digital-substations/protection-relays/feeder-protection-and-control/feeder-protection-and-control-ref615-iec. Acesso em: 21 set. 2025.

Transformadores de corrente (conforme a figura 4 A) e transformadores de potencial (conforme a figura 4 B) são utilizados para medir correntes e tensões, permitindo a operação segura dos relés de proteção e a medição de grandezas elétricas. Tecnologias recentes incluem sensores digitais que fornecem dados precisos em tempo real, integrando-se aos sistemas de supervisão e facilitando a análise de desempenho do sistema (MAMEDE FILHO, 2013).

Figura 4 - Transformadores de Uso Geral

A – Transformador de Corrente; B – Transformador de Potencial.
Fonte: Joclamar. Transformador de potencial 1000VA 15kV/115V 0,3P75 TPB Lig. 1 Fase/Fase. Joclamar, 2025. Disponível em: https://joclamar.com.br/product/transformador-de-potencial-1000va-15kv115v-03p75-tpb-lig-1-fasefase/. Acesso em: 5 out. 2025.

Além disso, outros componentes, como seccionadoras e fusíveis, também apresentam avanços tecnológicos significativos, aumentando a segurança operacional e permitindo uma manutenção mais rápida e segura. A combinação desses equipamentos, aliados a sistemas de automação e monitoramento, garante que o cubículo funcione de forma confiável, segura e eficiente, atendendo às exigências normativas e às necessidades da operação industrial (MAMEDE FILHO, 2013).

5.3 SEGURANÇA ELÉTRICA E ARCO INTERNO

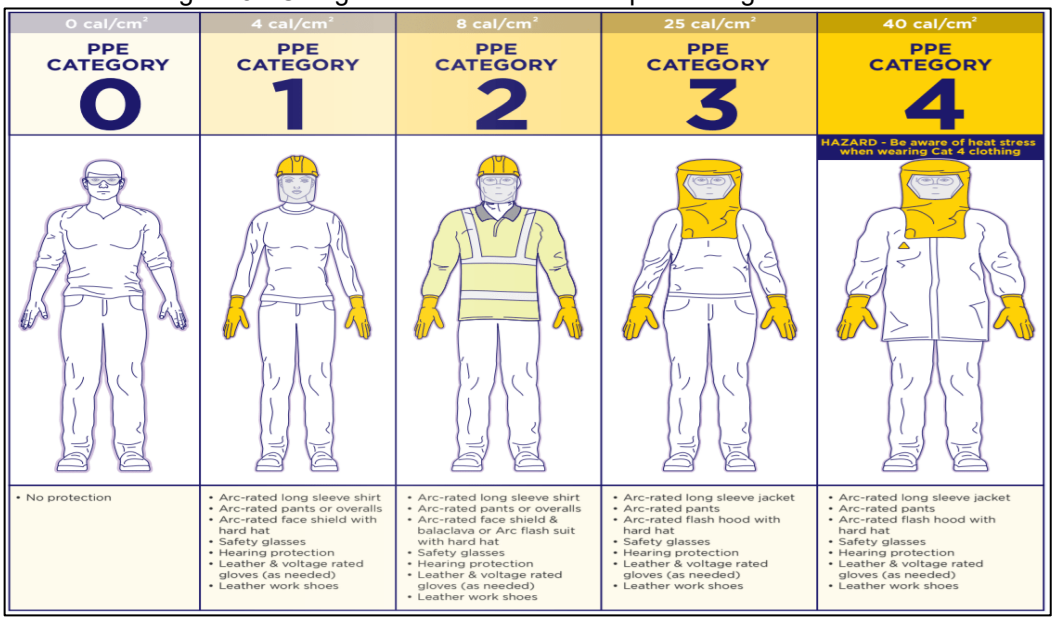
A segurança elétrica é um dos pilares fundamentais na operação de sistemas de média tensão, especialmente em ambientes industriais, onde a ocorrência de falhas pode resultar em sérios danos materiais e riscos à integridade dos operadores.

Um dos principais perigos associados aos cubículos de média tensão é o arco elétrico interno, que ocorre quando há uma descarga elétrica através do ar entre condutores ou entre condutores e partes aterradas, liberando uma grande quantidade de energia em forma de calor, luz e pressão (ABNT,2025).

O arco interno pode causar explosões, incêndios, danos irreversíveis aos equipamentos e graves acidentes aos colaboradores. Por isso, a prevenção e mitigação desse risco é essencial e envolve uma combinação de projetos adequados, manutenção, procedimentos operacionais e uso correto de equipamentos de proteção individual (EPI) (ABNT,2025). Entre as medidas preventivas, destacam-se a utilização de barreiras e compartimentações dentro do cubículo, intertravamentos mecânicos e elétricos, monitoramento constante de correntes e tensões e procedimentos de operação segura em conformidade com a NR10 (BRASIL, 2019).

A avaliação da energia incidente do arco elétrico, conforme a norma IEEE 1584, permite determinar a categoria de risco (conforme a figura 5) e definir os EPIs adequados para cada atividade, reduzindo significativamente a exposição dos operadores. Além disso, a implementação de disjuntores com proteção rápida, relés digitais e sistemas de supervisão contribui para minimizar a duração do arco e limitar seus efeitos, aumentando a segurança e a confiabilidade do sistema (ABNT,2025).

Figura 5 - Categorias de risco definidas pela energia incidente.



Fonte: THE ELECTRICITY FORUM. Arc Flash Categories by Voltage Chart. The Electricity Forum, 2025. Disponível em: https://electricityforum.com/iep/arc-flash/arc-flash-categories-by-voltage-chart. Acesso em: 21 set. 2025.

Dessa forma, a segurança elétrica em cubículos de média tensão depende não apenas da tecnologia empregada nos equipamentos, mas também de uma abordagem integrada que combina projeto, manutenção, normas técnicas e cultura de segurança operacional, assegurando a proteção de pessoas, equipamentos e continuidade da produção (ABNT,2025).

5.4 NORMAS E REQUISITOS LEGAIS

A operação e manutenção de cubículos de média tensão em ambientes industriais deve estar em conformidade com normas técnicas e regulamentações legais, garantindo a segurança dos trabalhadores e a confiabilidade do sistema elétrico. No contexto brasileiro, a NR10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade estabelece diretrizes para proteção de profissionais, exigindo procedimentos seguros, sinalização adequada, utilização de equipamentos de proteção individual e treinamento contínuo dos operadores (BRASIL,2019).

Complementando a NR10, as normas da série NBR IEC 62271 definem os requisitos técnicos para equipamentos de média tensão, incluindo características construtivas, ensaios, condições de operação e classificações de energia incidente. A NBR 14039 estabelece critérios específicos para instalações elétricas de média tensão em sistemas industriais e comerciais, orientando quanto a projeto, proteção, manutenção e operação segura (ABNT,2025).

Internacionalmente, normas como a IEEE 1584 fornecem metodologias para cálculo da energia incidente em arcos elétricos, permitindo avaliar os riscos e determinar a categoria de proteção necessária para os operadores (IEEE, 2018). Já a IEC 61850 trata da comunicação e integração entre dispositivos inteligentes, como relés de proteção e sistemas de supervisão, assegurando interoperabilidade, confiabilidade e rapidez na atuação de proteção (IEEE, 2018).

O cumprimento dessas normas é essencial não apenas para garantir a segurança dos colaboradores, mas também para assegurar a confiabilidade operacional e evitar penalidades legais (ABNT, 2021; BRASIL, 2019). Além disso, o atendimento aos requisitos normativos proporciona uma base sólida para a modernização de equipamentos e a implementação de tecnologias avançadas, contribuindo para a eficiência e sustentabilidade das operações industriais (MAMEDE FILHO, 2013).

5.5 AUTOMAÇÃO E PROTEÇÃO

A automação e a proteção desempenham um papel estratégico em sistemas de média tensão, garantindo que os sistemas elétricos industriais operem de forma segura, confiável e eficiente (MAMEDE FILHO, 2013; BRASIL, 2019). Os avanços tecnológicos permitiram que relés digitais e dispositivos inteligentes (IEDs) executem funções de proteção complexas, monitoramento em tempo real e integração com sistemas de supervisão, aumentando a precisão na detecção de falhas e reduzindo significativamente o risco de danos aos equipamentos e aos operadores (IEC, 2019; ABNT, 2021).

Os sistemas de proteção modernos englobam funções como sobrecorrente, sobre e subtensão, proteção de falta à terra e bloqueios lógicos, que atuam de maneira coordenada para isolar apenas a parte do sistema afetada pela falha, preservando a continuidade da operação nas demais áreas (NBR IEC 62271-200, 2025). A integração com protocolos de comunicação, como a IEC 61850, permite a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes, além de possibilitar diagnósticos remotos, registro de eventos e tomada de decisões mais rápida e segura (IEC, 2019).

A automação também contribui para a redução do tempo médio de reparo (MTTR), pois sistemas inteligentes indicam a localização exata da falha, status dos equipamentos e histórico de alarmes, auxiliando na manutenção preventiva e preditiva (MAMEDE FILHO, 2013). Essa abordagem integrada entre proteção, automação e monitoramento proporciona maior confiabilidade, diminuição de riscos de arco elétrico, otimização da operação e segurança operacional, consolidando os cubículos de média tensão como elementos essenciais para o funcionamento contínuo e seguro da planta industrial (BRASIL, 2019; ABNT, 2021).

6 DIAGNÓSTICO DO SISTEMA ORIGINAL

6.1 LEVANTAMENTO TÉCNICO

O levantamento técnico realizado identificou que a cabine de média tensão em análise é composta por seis colunas, sendo uma destinada à seccionadora de entrada e outras cinco equipadas com disjuntores de 6,6 kV responsáveis pela alimentação individual de transformadores. A tensão nominal de operação do conjunto é de 6,6 kV, padrão consolidado na planta industrial.

Os disjuntores instalados são do modelo Beghim BG, tipo PVO (pequeno volume de óleo), com acionamento por mola. Apesar de sua robustez, trata-se de equipamentos que apresentam limitações em relação à segurança, confiabilidade e facilidade de manutenção, sobretudo quando comparados às tecnologias mais atuais, como os disjuntores a vácuo. O sistema de proteção, por sua vez, contava com relés primários eletromecânicos, que, embora tenham atendido à aplicação por décadas, não oferecem os recursos de automação, integração e seletividade exigidos nos padrões modernos de proteção digital estando em desacordo com a NBR14039 item 5.3.4.1.

> Esses dispositivos de proteção devem poder interromper qualquer sobrecorrente menor ou igual à corrente de curto-circuito presumida no ponto em que o dispositivo está instalado. Tais dispositivos podem ser disjuntores acionados através de relés secundários com as funções 50 e 51, fase e neutro (onde é fornecido o neutro). Não são aceitos relés com princípio de funcionamento com retardo a líquido.

Quanto aos transformadores de corrente, a cabine estava equipada na barra principal com TC de 500/5 A, e nos alimentadores foram identificados um TC de 200/5 A, dois de 100/5 A e dois de 80/5 A. Esses equipamentos garantiam a medição e proteção das cargas, mas sua idade avançada levanta preocupações quanto à confiabilidade em situações críticas de operação (ABNT,2025).

Os TP’s a óleo (conforme a figura 6) presentes no cubículo antigo também apresentavam um risco significativo de incêndio e explosão, uma vez que o óleo mineral é inflamável e pode entrar em combustão caso ocorra superaquecimento, falha elétrica ou curto-circuito. Em situações de arco interno ou sobrecorrente, a pressão interna poderia provocar ruptura do equipamento, liberando gases inflamáveis estando em desacordo com a NBR14039 item 4.1.2.

> A instalação elétrica deve estar disposta de maneira a excluir qualquer risco de incêndio de materiais inflamáveis devido a temperaturas elevadas ou arcos elétricos. Além disso, em serviço normal, as pessoas e os animais não devem correr riscos de queimaduras.

Figura 6 – Transformadores de potencial instalados no cubículo.

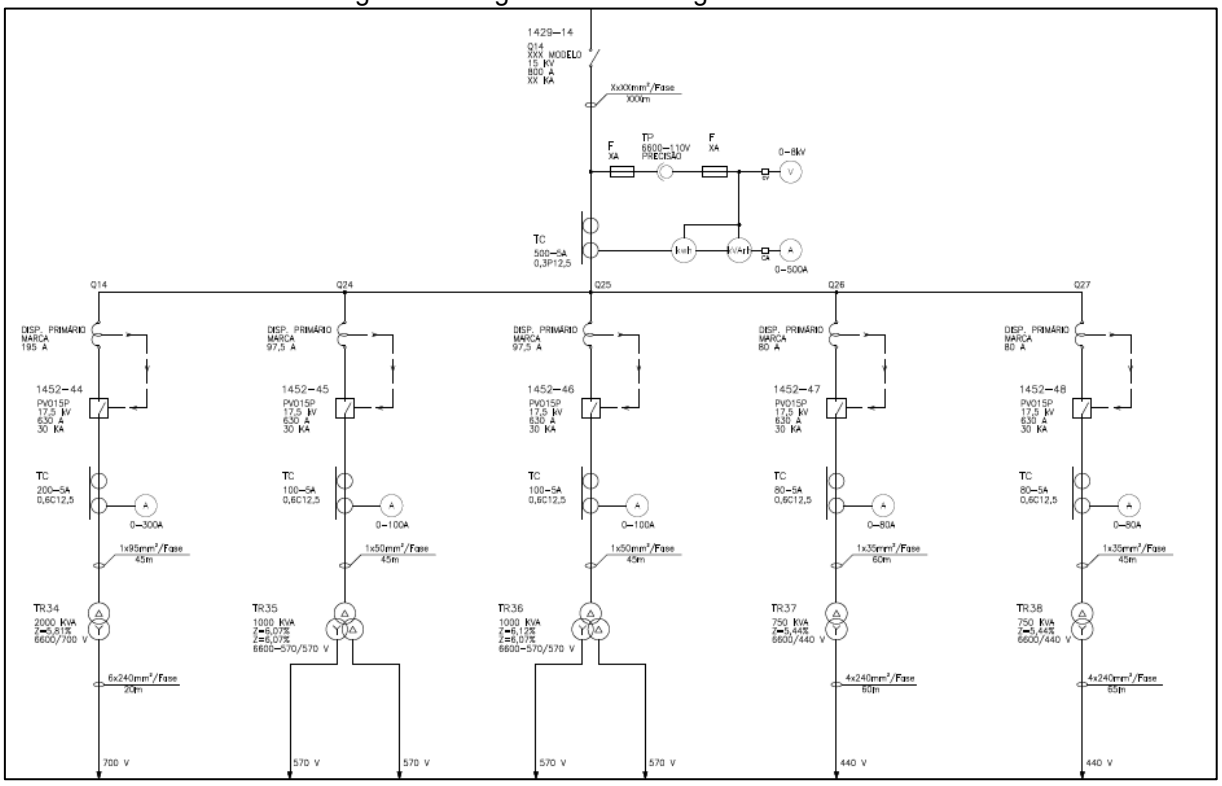
Fonte: Elaboração própria

Os registros históricos apontam que a cabine foi fabricada em 1987 pela BBC (Brown, Boveri & Cie), empresa que posteriormente deu origem à ABB. Assim, o sistema encontra-se em operação há mais de três décadas, o que naturalmente implica em desgaste dos componentes e obsolescência tecnológica. Esse diagnóstico reforça a necessidade de avaliação criteriosa sobre a continuidade do uso da estrutura existente frente às demandas atuais de segurança, disponibilidade e integração às práticas modernas de manutenção (MAMEDE FILHO, 2013).

6.2 DIAGRAMA UNIFILAR ORIGINAL

O diagrama unifilar original da cabine de 6,6 kV (demonstrado na figura 7), datado de 1987, apresenta uma barra principal com uma seccionadora de entrada e cinco alimentadores, cada um protegido por disjuntor a óleo Beghim BG tipo PVO. A filosofia de proteção era baseada em relés eletromecânicos primários, com ajustes simples de sobrecorrente de fase (MAMEDE FILHO, 2013).

Figura 7 - Diagrama unifilar original da cabine.



Fonte: Elaboração própria

A coordenação seletiva era limitada e estabelecida apenas por escalonamento de tempos, sem recursos de comunicação ou funções avançadas (MAMEDE FILHO, 2013). Essa configuração, embora adequada para a época, hoje apresenta restrições quanto à rapidez de atuação e confiabilidade.

6.3 AVALIAÇÃO DE RISCO

A avaliação do risco de arco elétrico na cabine de média tensão de 6,6 kV evidencia condições operacionais críticas, tanto para a segurança dos operadores quanto para a confiabilidade do fornecimento interno de energia. O sistema analisado apresenta características construtivas antigas, com cubículos metálicos convencionais, disjuntores PVO a óleo e relés de sobrecorrente do tipo eletromecânico Beghim BG, tecnologias que, embora tenham sido amplamente utilizadas em décadas anteriores, não atendem mais plenamente aos requisitos de segurança e desempenho estabelecidos pelas normas atuais (BRASIL, 2019).

Com base nas informações técnicas e nas condições observadas, a energia incidente estimada na entrada dos disjuntores situa-se em um patamar elevado, o que indica níveis de exposição acima dos limites considerados seguros para atividades de

operação e manutenção (MAMEDE FILHO, 2013). Esse resultado demonstra que, em caso de ocorrência de um arco elétrico, as consequências poderiam ser severas, tanto em relação a danos pessoais quanto a prejuízos patrimoniais e interrupções prolongadas na operação da planta industrial.

A natureza construtiva dos disjuntores a óleo implica tempos de atuação relativamente longos, em razão do princípio de extinção do arco por meio da decomposição do óleo isolante. Esse mecanismo, embora robusto, gera uma resposta mais lenta às correntes de falha, o que aumenta o tempo de exposição ao arco e, consequentemente, o estresse térmico e mecânico sobre os componentes internos. Aliado a isso, o sistema de proteção eletromecânico, por depender de elementos mecânicos de disparo e retardo, não permite ajustes finos ou comunicações digitais, limitando sua integração com sistemas de supervisão e diagnóstico remoto (MAMEDE FILHO, 2013).

Outro fator agravante é a ausência de dispositivos modernos de mitigação de arco interno, tais como compartimentações testadas segundo a IEC 62271-200, barreiras de segregação entre compartimentos energizados (demonstrado na figura 8), sensores de luz e pressão, e intertravamentos elétricos e mecânicos. A inexistência desses recursos aumenta a probabilidade de que um evento de arco se propague entre compartimentos, ampliando o dano e expondo operadores a riscos severos. Em casos extremos, esse tipo de falha pode gerar danos irreversíveis aos equipamentos, paradas não programadas e altos custos de reparo e substituição (ABNT, 2025).

Figura 8 - Parte interna do cubículo de proteção.

Fonte: Elaboração própria

Adicionalmente, a falta de integração digital entre os relés de proteção e a ausência de funções de atuação rápida comprometem a capacidade do sistema em isolar de forma seletiva o trecho afetado por uma falha. Assim, uma ocorrência localizada pode resultar em desligamento de uma área inteira, prejudicando a continuidade operacional e elevando o tempo de indisponibilidade. Essa limitação demonstra a importância da coordenação e seletividade das proteções, que, quando bem projetadas, restringem o impacto da falha ao menor número possível de equipamentos e alimentadores (MAMEDE FILHO, 2013).

Diante desse contexto, a análise conclui que a cabine apresenta alto risco de arco elétrico e baixa eficiência operacional, sendo imprescindível a modernização ou substituição dos equipamentos existentes. A adoção de disjuntores a vácuo, relés digitais microprocessados e sistemas de comunicação via protocolos como a IEC 61850 permitiria reduzir significativamente o tempo de atuação das proteções, diminuindo a energia incidente e aumentando a segurança dos colaboradores (ABNT, 2025).

Além da melhoria técnica, a atualização tecnológica contribuiria para aumentar a confiabilidade e disponibilidade do sistema elétrico, facilitar diagnósticos remotos e otimizar planos de manutenção preventiva, em conformidade com as recomendações da NR-10, da NBR 14039 e das melhores práticas internacionais de engenharia elétrica. Dessa forma, a modernização não se limita apenas à substituição de equipamentos, mas representa uma evolução no nível de segurança, eficiência e inteligência do sistema elétrico de média tensão da planta (MAMEDE FILHO, 2013).

6.4 CONFORMIDADE NORMATIVA

A análise da cabine de média tensão de 6,6 kV evidenciou que os equipamentos originais não atendem plenamente aos requisitos estabelecidos pela NR-10 e pela NBR 14039, apresentando riscos significativos à operação elétrica segura. Um dos pontos mais críticos identificados foi o elevado nível de energia incidente na entrada dos cubículos, estimado em patamar acima dos limites considerados seguros para atividades de operação e manutenção. Essa condição indica que, em caso de falha, há potencial para ocorrência de arco elétrico de grande intensidade, capaz de gerar altas temperaturas, pressão e emissão de partículas

metálicas, colocando em risco a integridade física dos trabalhadores e a estabilidade dos equipamentos instalados (MAMEDE FILHO, 2013).

Além do risco direto ao operador, essa condição também impacta negativamente a confiabilidade e a disponibilidade do sistema elétrico, podendo resultar em paradas não programadas e danos estruturais severos aos painéis e disjuntores. A ausência de dispositivos modernos de mitigação de arco interno, como compartimentações testadas, sensores de luz e intertravamentos, agrava ainda mais o cenário, reforçando a necessidade de modernização dos equipamentos e atualização das proteções, de modo a reduzir a energia incidente e garantir conformidade com os padrões atuais de segurança e desempenho (ABNT, 2025).

Além disso, os cubículos antigos apresentam condições perigosas de operação elétrica, em função da tecnologia empregada nos relés de proteção e disjuntores PVO presentes na cabine (conforme a figura 9). Os relés de sobrecorrente primários Beghim BG utilizam o princípio de retardo por meio de óleo mineral, item em desacordo com a NBR14039 – Item 9.4.3

> Quando a subestação de transformação fizer parte integrante da edificação industrial, somente é permitido o emprego de transformadores de líquidos isolantes não inflamáveis ou transformadores a seco e disjuntores a vácuo ou SF6.

Figura 9 - Parte externa dos cubículos de proteção com disjuntores PVO

Fonte: Elaboração própria

A cabine não possuí sistema de autonomia, também em desacordo com a NBR14039- Item 5.3.4.1, que estabelece que relés do tipo microprocessado, digital ou

autoalimentado devem dispor de fonte de alimentação de reserva com autonomia mínima de 2 horas.

> Dispositivos que garantem simultaneamente a proteção contra correntes de sobrecarga e contra correntes de curto circuito: Quando forem utilizados relés com as funções 50 e 51 do tipo microprocessado, digital, autoalimentados ou não, deve ser garantida, na falta de energia, uma fonte de alimentação de reserva, com autonomia mínima de 2 h, que garanta a sinalização dos eventos ocorridos e o acesso à memória de registro dos relés.

A cabine apresentava alto nível de incidência de arco interno, com energia incidente, configurando descumprimento da NR10, item 10.4.4, que exige que as instalações elétricas sejam mantidas em condições seguras.

> As instalações elétricas devem ser mantidas em condições seguras de funcionamento e seus sistemas de proteção devem ser inspecionados e controlados periodicamente, de acordo com as regulamentações existentes e definições de projetos.

Portanto, embora a cabine tenha atendido às normas vigentes na época de sua fabricação, suas condições atuais não estão em conformidade com os requisitos modernos de segurança, seletividade e confiabilidade, reforçando a necessidade de substituição e modernização do sistema. Essa situação evidencia a importância de adequação às normas vigentes, garantindo proteção efetiva contra falhas elétricas e minimizando riscos de acidentes aos colaboradores.

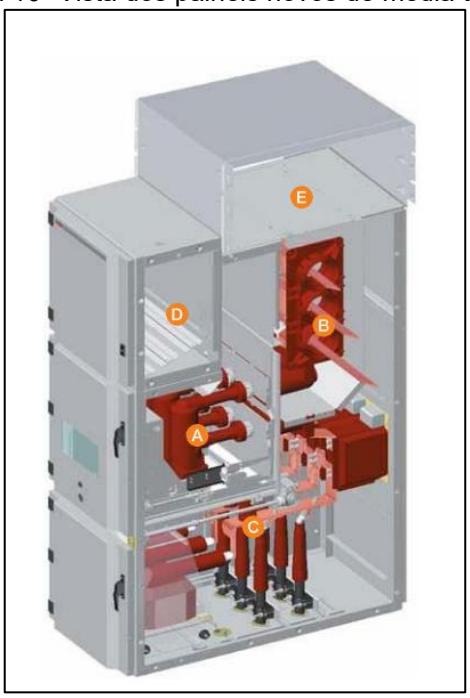
7 DEFINIÇÃO DE REQUISITOS PARA SUBSTITUIÇÃO

7.1 REQUISITOS TÉCNICOS E DE DESEMPENHO

A substituição da cabine de 6,6 kV foi pautada em requisitos técnicos que garantem tanto a confiabilidade operacional quanto a aderência aos padrões mais atuais de desempenho. O novo sistema foi especificado segundo a IEC 62271-200, adotando configuração de barramento simples (demonstrado na figura 10), adequada às condições operacionais da planta. A instalação foi projetada para operar em tensão nominal de 17,5 kV, com tensão de serviço de 6,9 kV e frequência de 60 Hz, assegurando compatibilidade com o sistema existente (ABNT,2025).

Do ponto de vista da robustez elétrica, o cubículo foi dimensionado para suportar correntes de curto-circuito simétricas de até 31,5 kA por 1 segundo, com corrente nominal de barramento de 1250 A (ABNT,2025). A confiabilidade foi ampliada com a adoção de disjuntores a vácuo, em substituição aos antigos PVO a óleo, reduzindo custos de manutenção, riscos de falha e aumentando a vida útil do equipamento (ABNT,2025).

Figura 10- Vista dos painéis novos de média tensão



Fonte: ABB. Painéis de Média Tensão UniGear ZS1 – Manual Técnico. ABB, 2025. Disponível em: https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1VCP000138&LanguageCode=pt&DocumentPartId=&Action=Launch. Acesso em: 1 nov. 2025.

A segurança operacional foi reforçada com classificação de arco interno IAC A FLR, permitindo resistir a falhas com arco elétrico em todas as faces, além da perda de continuidade LSC 2B e classe de segregação PM, garantindo compartimentação adequada. O grau de proteção externo IP4X e interno IP20 asseguram maior proteção contra contato acidental e contra partículas sólidas, atendendo às condições ambientais industriais (ABNT,2025).

Outro ponto de desempenho relevante é a flexibilidade para integração futura. A nova cabine é projetada com protocolo de comunicação IEC 61850, incluindo GOOSE, permitindo supervisão, medição e comando direto pelo supervisório. Para isso, todos os pontos de status, medição e comando foram mapeados, parametrizados e disponibilizados em conformidade com as boas práticas de configuração do IEC 61850 (ABNT,2025).

Por fim, os requisitos técnicos contemplaram a execução do comissionamento, com ensaios conforme a IEC 62271-200, treinamento para a equipe de operação e manutenção, além de cronograma de substituição planejado para minimizar o tempo de parada, estimado em cinco dias do desligamento ao startup. Dessa forma, assegura-se que a nova solução atenda plenamente às necessidades de desempenho, confiabilidade e continuidade operacional da planta (ABNT,2025).

7.2 REQUISITOS NORMATIVOS E DE SEGURANÇA

Todos os equipamentos, serviços e procedimentos relacionados ao fornecimento, modernização e instalação dos painéis de média tensão devem atender rigorosamente às normas vigentes de segurança, garantindo a proteção dos trabalhadores, a integridade dos ativos e a confiabilidade do sistema elétrico. Entre as principais normas aplicáveis destacam-se:

- NR-10 (Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade) – assegurando que todas as atividades sejam realizadas por profissionais qualificados, com emissão da documentação necessária e aplicação das medidas de proteção coletiva e individual.
- NBR 14039 (Instalações Elétricas de Média Tensão de 1,0 kV a 36,2 kV) – garantindo que os cubículos atendam aos requisitos de projeto, construção e operação, inclusive quanto ao uso de dispositivos de proteção adequados, segregação de compartimentos e acessibilidade segura.

- IEC 62271-200 – estabelecendo critérios de projeto, ensaios de tipo e classificação dos painéis quanto a arco interno, continuidade de serviço e grau de proteção IP.

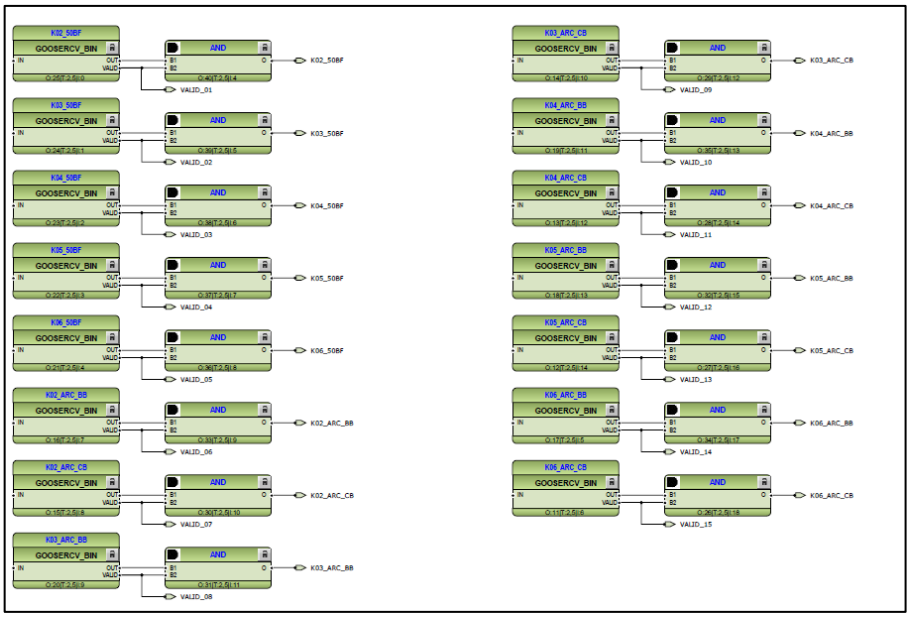
Além disso, deverá ser assegurado que os painéis sejam projetados com recursos que reduzam o risco de arco elétrico, como dispositivos de alívio de pressão, dutos de exaustão e segregação de barramentos. A operação e manutenção só poderão ser realizadas com as portas fechadas, em conformidade com os requisitos normativos (ABNT, 2025).

7.3 REQUISITOS DE AUTOMAÇÃO E INTEGRAÇÃO

O sistema será totalmente preparado para integração ao supervisório, permitindo o monitoramento em tempo real, o registro detalhado de eventos e a execução remota de comandos de forma segura e confiável. Essa arquitetura possibilitará a visualização contínua do estado dos alimentadores, transformadores e disjuntores, garantindo a rápida detecção e resposta a ocorrências anormais (MAMEDE FILHO, 2013).

Os painéis de média tensão serão equipados com relés de proteção digitais REF615, devidamente parametrizados, operando sob o protocolo IEC 61850, norma internacional que padroniza a comunicação entre dispositivos em sistemas elétricos de potência (O SETOR ELÉTRICO, 2025). O suporte à comunicação GOOSE (Generic Object-Oriented Substation Event) permitirá a troca direta, rápida e determinística de mensagens entre os IEDs (Intelligent Electronic Devices), eliminando a necessidade de intertravamentos por cabeamento convencional e reduzindo significativamente o tempo de resposta em situações de falha (como demonstrado na figura 11). Essa comunicação, característica da IEC 61850, garante maior confiabilidade e flexibilidade ao sistema de proteção e controle (O SETOR ELÉTRICO, 2025).

Figura 11- Pontos disponibilizados em GOOSE dos relés de proteção



Fonte: Elaboração própria

Complementarmente, a estrutura de comunicação será baseada em rede de fibra óptica dedicada, garantindo alta velocidade e imunidade a interferências eletromagnéticas. A utilização de switches gerenciáveis e VLANs específicas permitirá segregação lógica de tráfego, assegurando que as mensagens de proteção e comando tenham prioridade máxima de transmissão (MAMEDE FILHO, 2013). Dessa forma, o sistema atende plenamente às exigências de segurança cibernética e integridade de dados, conforme recomendações das normas IEC 62443 e IEEE 1686.

Com a implantação dessa filosofia de automação e integração, a cabine passará a operar dentro dos conceitos de Subestação Digital, permitindo monitoramento remoto, manutenção preditiva e diagnóstico avançado de eventos. Essa modernização representa um avanço significativo na gestão do sistema elétrico, elevando os níveis de eficiência, segurança e disponibilidade, e estabelecendo as bases para a integração futura com plataformas de gestão de ativos e soluções de Indústria 4.0 (MAMEDE FILHO, 2013).

7.4 REQUISITOS DE MANUTENÇÃO E OPERAÇÃO SEGURA

O novo cubículo deverá garantir condições adequadas de manutenção e operação segura, em conformidade com as normas técnicas e regulamentações vigentes, reduzindo significativamente os riscos de acidentes elétricos e assegurando maior confiabilidade ao sistema (BRASIL, 2019). O projeto foi desenvolvido com foco

na facilidade de acesso e na segurança operacional, prevendo acesso frontal total a todos os compartimentos, o que facilita inspeções periódicas, intervenções corretivas e substituição de componentes sem a necessidade de retirada do painel de serviço. Essa característica atende às boas práticas de manutenção estabelecidas pela NBR 14039, permitindo intervenções rápidas e seguras, com menor tempo de indisponibilidade.

Para garantir um ambiente de manutenção mais confiável, o projeto contempla a instalação de sistemas de aquecimento e iluminação internos, que favorecem a visibilidade durante as inspeções e reduzem a umidade relativa no interior dos painéis (demonstrados na figura 12). Essa solução técnica contribui para a prevenção de falhas por condensação, prolongando a vida útil dos componentes e mantendo a isolação elétrica dentro dos parâmetros adequados (ABNT, 2025). Além disso, os materiais empregados no invólucro metálico e nos isoladores atendem às exigências de resistência mecânica e térmica previstas nas normas da série IEC 62271, assegurando robustez e durabilidade mesmo em ambientes industriais severos (ABNT, 2025).

Figura 12- Acesso frontal no painel de comando

Fonte: Elaboração própria

A operação do novo conjunto será realizada com disjuntores extraíveis em carrinho motorizado (demonstrado na figura 13), o que possibilita manobras com o compartimento fechado, eliminando a exposição direta do operador a partes

energizadas. Essa filosofia de operação "porta fechada" é uma das práticas mais seguras em sistemas de média tensão e garante que tanto as manobras de inserção quanto as de extração sejam executadas de forma controlada e protegida. O grau de proteção IP4X externo e IP20 interno, aliado à classificação de arco interno IAC AFLR, assegura níveis superiores de proteção contra contato acidental e contra os efeitos térmicos e dinâmicos de um possível arco elétrico, atendendo plenamente às exigências das normas IEC 62271-200 e NBR 14039 (ABNT, 2025).

Figura 13- Testes sendo realizados durante comissionamento

Fonte: Elaboração própria

Outro aspecto importante é a adoção de intertravamentos elétricos e mecânicos entre compartimentos, portas e dispositivos de manobra (ABNT, 2025). Esses sistemas evitam a abertura acidental de seções energizadas e impedem a execução de comandos incorretos, aumentando a segurança operacional (BRASIL, 2019). As botoeiras mecânicas externas, posicionadas ergonomicamente, permitem o comando manual seguro de disjuntores e seccionadores, oferecendo redundância em relação aos comandos elétricos. Essa configuração aumenta a confiabilidade operacional e permite a continuidade das manobras mesmo em caso de falhas no circuito de controle.

Complementarmente, o projeto incorpora recursos de monitoramento e manutenção preditiva, com sensores de temperatura e status de disjuntores

integrados ao sistema supervisório (ABNT, 2025). Esses sensores permitem a identificação precoce de anomalias, reduzindo a necessidade de intervenções emergenciais e aprimorando o planejamento das paradas de manutenção. Dessa forma, a gestão dos ativos torna-se mais eficiente, permitindo ações preventivas baseadas em dados reais de operação.

A combinação de todos esses requisitos proporciona um ambiente de trabalho mais seguro e tecnicamente evoluído, com menor exposição dos profissionais aos riscos inerentes à média tensão, aumento da confiabilidade dos ativos e prolongamento da vida útil dos equipamentos (BRASIL, 2019). O resultado é um sistema alinhado às práticas modernas de engenharia elétrica e à cultura de segurança exigida pelas normas nacionais e internacionais, consolidando a modernização da cabine como uma solução completa e sustentável do ponto de vista técnico e operacional.

8 EXECUÇÃO DA SUBSTITUIÇÃO

8.1 PLANEJAMENTO E CRONOGRAMA DA INTERVENÇÃO

A execução da substituição do cubículo de média tensão foi cuidadosamente planejada para garantir segurança, eficiência e mínima interrupção no fornecimento de energia. O cronograma da parada (demonstrado na figura 15) foi definido de forma a otimizar o tempo de execução e reduzir impactos operacionais, iniciando-se com o desligamento e bloqueio das fontes de energia, conforme os procedimentos de segurança da NR10 (BRASIL, 2019). Essa etapa assegurou que toda a equipe envolvida realizasse as atividades em condições seguras e controladas (demonstrado na figura 14). Após a liberação da área, foi realizada a desmontagem dos cubículos existentes, incluindo a desconexão dos cabos de potência, transformadores de corrente e painéis de proteção antigos.

Na sequência, ocorreu a instalação dos novos cubículos de média tensão, seguindo rigorosamente o alinhamento mecânico, as conexões elétricas e os intertravamentos de segurança. Foram executadas as interligações dos circuitos de controle, proteção e supervisão, assegurando total compatibilidade com o sistema existente. Essa etapa foi concluída com os testes funcionais e de comissionamento, garantindo o correto funcionamento das proteções e a confiabilidade do novo conjunto antes do retorno à operação.

Figura 14- Desmontagem e montagem da cabine

Fonte: Elaboração própria

Em paralelo às atividades de montagem mecânica, foi realizada a passagem e conexão dos cabos de alimentação e de proteção, seguindo os critérios de identificação e dimensionamento adequados. Essa etapa garantiu a correta distribuição de energia entre os alimentadores e o novo conjunto de cubículos, além de estabelecer a comunicação confiável entre os dispositivos de proteção e o sistema supervisório (MAMEDE FILHO, 2013).

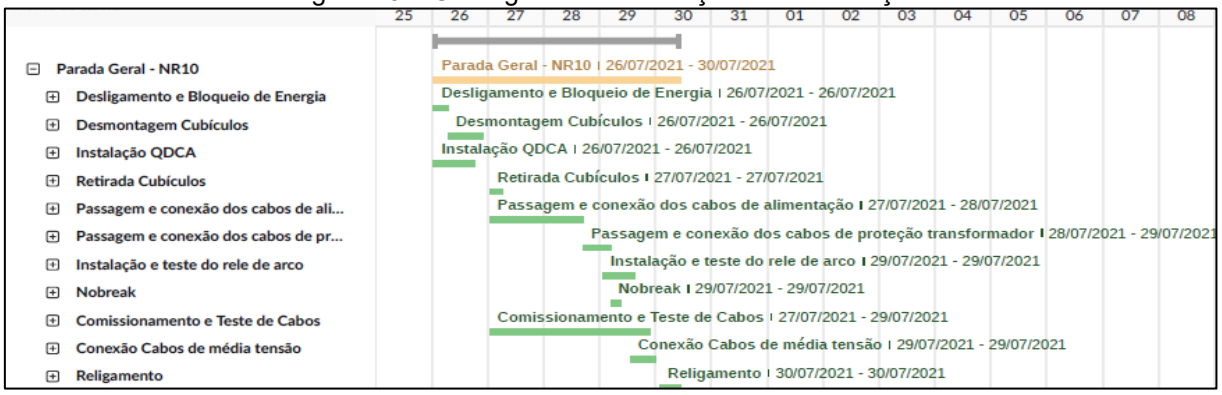
Durante a instalação, foi dada atenção especial aos terminais de conexão, isolação e aterramento, assegurando a integridade elétrica e o desempenho adequado do sistema em regime permanente e de falta. Foram realizadas medições de continuidade, resistência de isolamento e verificação do sentido de fase, assegurando conformidade com os padrões técnicos (MAMEDE FILHO, 2013).

A instalação e teste do sistema de detecção de arco elétrico constituíram etapas críticas do projeto, por se tratar de um dispositivo essencial à segurança operacional. Esse sistema foi configurado para detectar emissões luminosas dos compartimentos do disjuntor e dos barramentos, garantindo atuações instantâneas em caso de falhas internas, minimizando danos aos equipamentos e riscos à integridade física dos operadores (ABNT, 2025). Paralelamente, a instalação do Nobreak assegurou a alimentação contínua dos circuitos de controle e proteção, mesmo em situações de perda da rede principal, mantendo a funcionalidade dos relés e do sistema supervisório.

Concluídas as conexões e montagens, iniciou-se o comissionamento elétrico do sistema, etapa fundamental para validar a integridade e o correto funcionamento de todos os circuitos. Foram executados testes de continuidade, isolação e polaridade dos cabos, além da conexão final dos cabos de média tensão ao novo cubículo. Em sequência, procedeu-se ao comissionamento do painel de controle e dos relés de proteção do modelo REF615 da ABB, abrangendo a verificação das lógicas de intertravamento, dos sinais analógicos e digitais, e o levantamento das curvas de atuação parametrizadas nos relés, assegurando total conformidade com o estudo de seletividade e coordenação das proteções (MAMEDE FILHO, 2013).

Por fim, foi realizado o religamento do sistema, confirmando o funcionamento pleno das proteções, intertravamentos e supervisão. Os resultados dos testes validaram a eficácia da modernização, comprovando a confiabilidade operacional e a segurança elétrica de todo o conjunto, agora alinhado às normas técnicas vigentes e aos padrões de desempenho exigidos para sistemas de média tensão.

Figura 15 – Cronograma de execução da substituição



Fonte: Elaboração própria

9 COMPARAÇÕES

9.1 COORDENAÇÃO E SELETIVIDADE

O sistema de proteção da cabine de 6,6 kV, conforme o diagrama unifilar original datado de 1987, era composto por uma barra principal alimentando cinco circuitos através de disjuntores a óleo Beghim BG tipo PVO. A filosofia de proteção adotada baseava-se em relés eletromecânicos primários, ajustados unicamente para as funções de sobrecorrente de fase (MAMEDE FILHO, 2013). Essa configuração refletia a tecnologia disponível à época, porém apresenta limitações significativas diante das exigências atuais de desempenho, seletividade e confiabilidade (ABNT, 2021).

A coordenação seletiva entre os dispositivos era realizada apenas por escalonamento de tempos, sem qualquer forma de comunicação entre relés. Essa limitação comprometia a rapidez e a precisão na atuação das proteções, podendo resultar em desligamentos indevidos de alimentadores ou até do barramento principal em situações de falta localizada (MAMEDE FILHO, 2013). Além disso, a ausência de registros de eventos e medições dificultava a análise pós-falta e a identificação das causas de distúrbios, reduzindo a eficiência das ações corretivas.

Os relés primários instalados na subestação, todos do tipo Beghim BG, possuíam ajustes fixos de corrente nominal e apenas a função 50 – Sobrecorrente Instantânea de Fase. Essa configuração demonstrava a inexistência de seletividade temporal ou lógica entre os alimentadores e o circuito de entrada da cabine (MAMEDE FILHO, 2013). Além da limitação imposta pelos relés, a própria configuração original da cabine, que utilizava uma seccionadora na entrada em vez de um disjuntor, impossibilitava a coordenação adequada entre as proteções de montante e jusante. Dessa forma, qualquer falta que exigisse o desligamento da alimentação principal dependia de intervenção manual, comprometendo a seletividade e a confiabilidade operacional do sistema (ABNT, 2021).

A utilização exclusiva da função de sobrecorrente instantânea, sem curvas temporizadas ou funções direcionais (demonstradas na tabela 1), impedia a discriminação precisa do ponto de falta, comprometendo a seletividade entre os disjuntores dos alimentadores e o disjuntor de entrada da cabine (MAMEDE FILHO, 2013). Consequentemente, falhas restritas a um circuito poderiam provocar o

desligamento total da barra, reduzindo a disponibilidade do sistema e expondo os equipamentos a esforços desnecessários.

Tabela 1- Ajustes dos relés primários

TR-34	BG, In = 150A BEGHIM	50 – Sobrecorrente Instantânea de Fase
TR-35	BG, In = 75A BEGHIM	50 – Sobrecorrente Instantânea de Fase
TR-36	BG, In = 75A BEGHIM	50 – Sobrecorrente Instantânea de Fase
TR-37	BG, In = 50A BEGHIM	50 – Sobrecorrente Instantânea de Fase
TR-38	BG, In = 50A BEGHIM	50 – Sobrecorrente Instantânea de Fase

Fonte: Elaboração própria

A substituição dos relés eletromecânicos obsoletos pelo conjunto transformador de corrente, disjuntor e relé digital multifunção, representa um avanço significativo na filosofia de proteção da cabine (MAMEDE FILHO, 2013). Os novos relés incorporam funções ajustáveis de sobrecorrente temporizada de fase e neutro (51 e 51N), sobrecorrente instantânea (50 e 50N), bloqueios lógicos e coordenação seletiva com os disjuntores a montante, assegurando que apenas o trecho afetado por uma falta seja isolado (ABNT, 2021). Essa modernização garante uma atuação mais rápida, seletiva e confiável, reduzindo a abrangência das interrupções e aumentando a continuidade de serviço.

Além das funções tradicionais de sobrecorrente, a nova configuração contempla proteções avançadas que ampliam a segurança e o controle do sistema. Entre elas, destaca-se a proteção e detecção de arco elétrico, responsável por identificar de forma instantânea falhas internas no barramento ou compartimentos de disjuntores, permitindo a abertura imediata do circuito e mitigando riscos de danos catastróficos aos equipamentos e aos operadores (MAMEDE FILHO, 2013).

Outra função implementada é a proteção de falha de disjuntor (50BF), que atua de forma coordenada entre os disjuntores de carga e o disjuntor de entrada da cabine. Caso um disjuntor de alimentador não atue dentro do tempo esperado, o relé envia um comando de abertura para o disjuntor de montante, garantindo a eliminação da falta e a segurança da instalação. Essa função é essencial em sistemas de média

tensão, onde a falha de abertura pode resultar em esforços térmicos e dinâmicos elevados sobre o barramento e transformadores (MAMEDE FILHO, 2013).

Os novos relés também incorporam recursos de oscilografia e registro de eventos, que possibilitam o armazenamento detalhado das formas de onda e das grandezas elétricas durante as ocorrências (MAMEDE FILHO, 2013). Esse recurso permite análises pós-falta precisas, facilitando o diagnóstico de distúrbios e a identificação da sequência exata de eventos. A disponibilidade dessas informações aprimora o processo de manutenção preditiva e contribui para o aprimoramento contínuo das estratégias de proteção.

Com a adoção dessa nova arquitetura, o sistema passa a dispor de uma proteção mais completa, inteligente e confiável. A coordenação seletiva com os disjuntores a montante garante maior continuidade operacional, enquanto as funções avançadas, como detecção de arco elétrico, falha de disjuntor (50BF) e oscilografia elevam o nível de segurança e rastreabilidade das ocorrências. Dessa forma, a modernização das proteções da cabine atende plenamente às recomendações das normas NBR 14039 e NR10, consolidando uma instalação com maior confiabilidade, disponibilidade e segurança operacional (BRASIL, 2019).

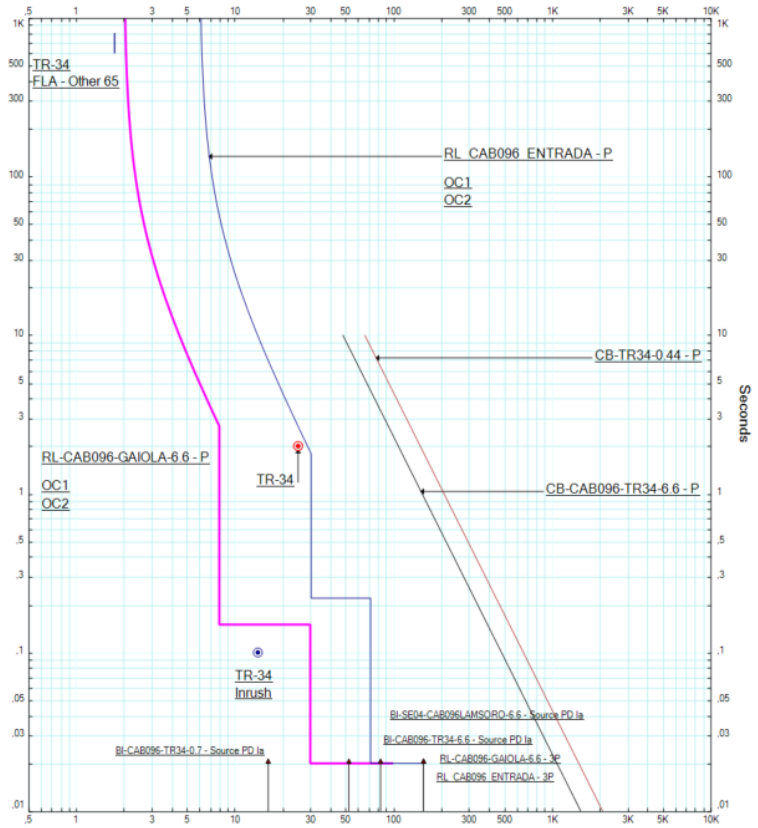
Para complementar a análise e demonstrar a eficácia da nova filosofia de proteção proposta, serão apresentados os diagramas de seletividade correspondentes aos relés instalados nos alimentadores de transformadores e no disjuntor de entrada da cabine. Esses diagramas evidenciam a coordenação entre as curvas de atuação de sobrecorrente temporizada e instantânea, assegurando que apenas o dispositivo mais próximo do ponto de falta atue, preservando a continuidade do fornecimento e evitando desligamentos desnecessários de outros circuitos (MAMEDE FILHO, 2013).

Os coordenogramas foram elaborados por meio do software ETAP, ferramenta amplamente utilizada em estudos de sistemas elétricos de potência para análise de seletividade, curto-circuito e proteção. O uso do ETAP possibilitou a simulação precisa dos tempos de atuação e das correntes de disparo dos dispositivos, permitindo verificar a coerência entre os ajustes propostos e as características dos relés digitais implementados.

A representação gráfica das curvas (demonstradas nas figuras 16, 17, 18, 19 e 20) permite visualizar o escalonamento correto dos tempos e correntes de atuação, confirmando que o sistema atende às boas práticas de coordenação seletiva exigidas

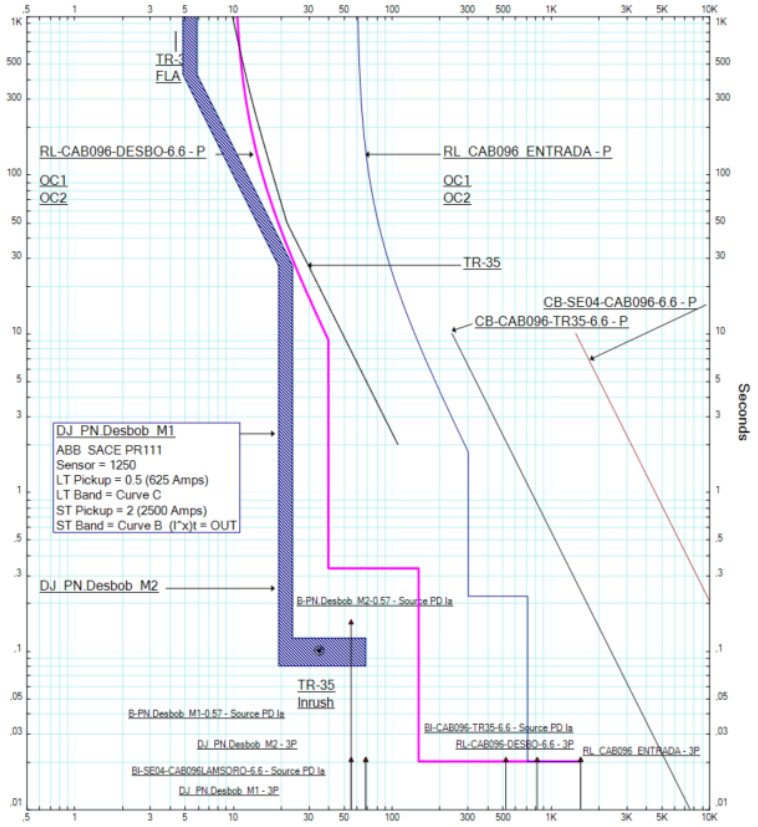
em instalações de média tensão (MAMEDE FILHO, 2013). Dessa forma, comprova-se que a nova filosofia de proteção garante maior confiabilidade operacional, redução do tempo de desligamento em falhas e maior segurança para os operadores e equipamentos.

Figura 16- Coordenograma de entrada da cabine



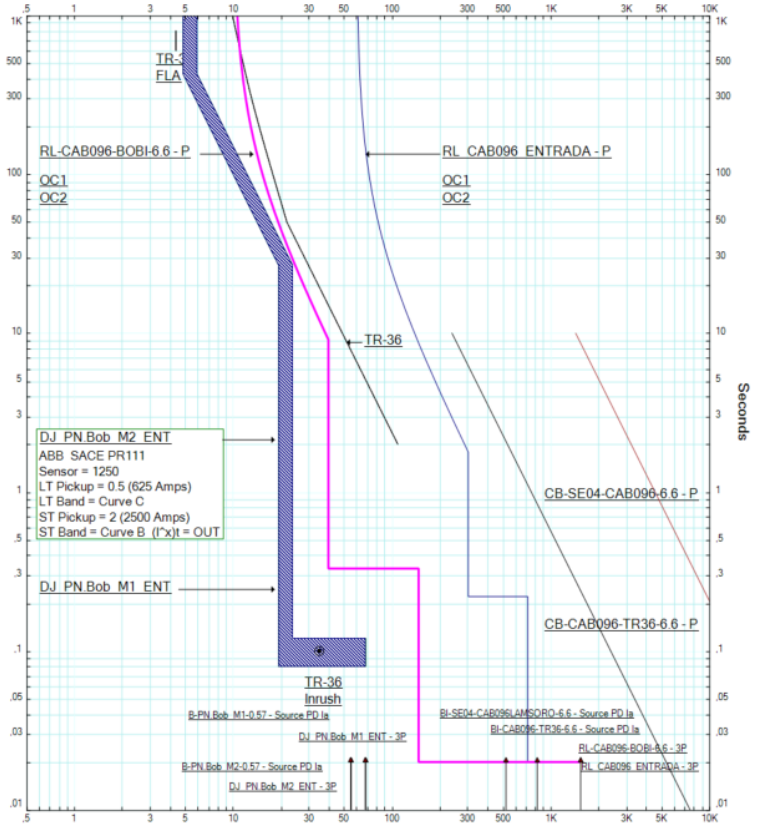
Fonte: Elaboração própria

Figura 17- Coordenograma transformador 35



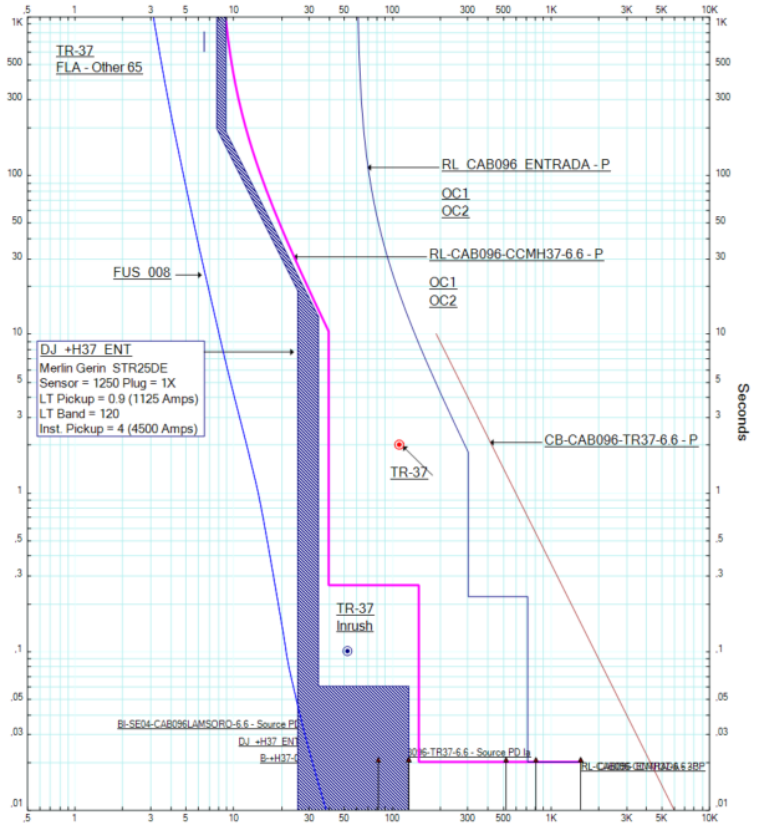
Fonte: Elaboração própria

Figura 18- Coordenograma transformador 36



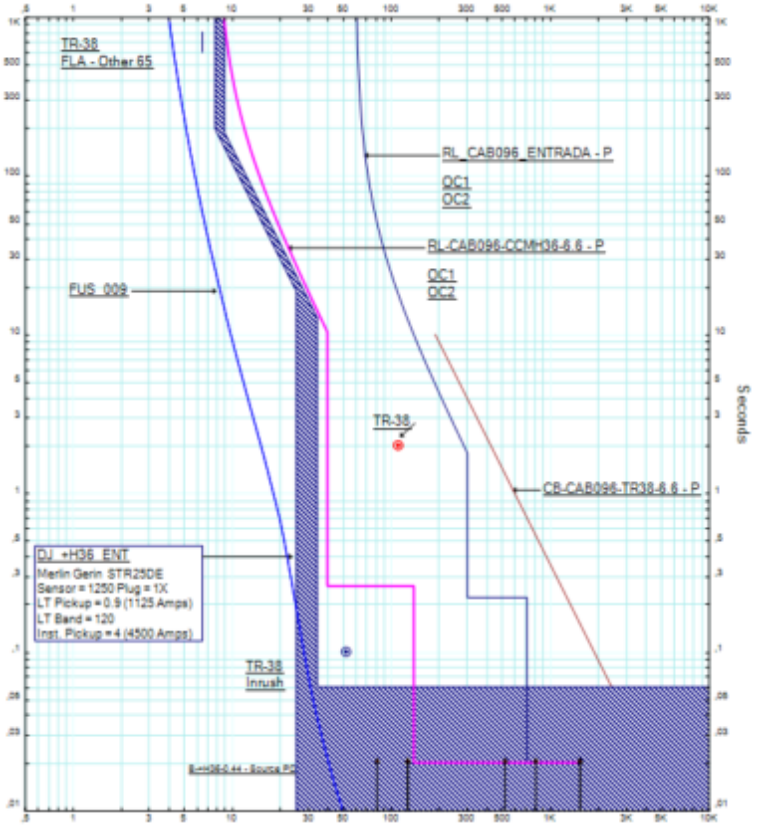
Fonte: Elaboração própria

Figura 19- Coordenograma transformador 37



Fonte: Elaboração própria

Figura 20- Coordenograma transformador 38



Fonte: Elaboração própria

9.2 PROTEÇÕES IMPLEMENTADAS

Nos novos cubículos de média tensão, foram implementadas proteções digitais avançadas com o objetivo de maximizar a confiabilidade, a segurança e a integridade operacional do sistema elétrico. Entre as melhorias adotadas, destaca-se a instalação de proteções contra arco interno em todos os compartimentos, capazes de detectar e extinguir rapidamente qualquer ocorrência de arco elétrico, promovendo o desligamento automático do circuito em milissegundos. Essa medida reduz drasticamente os riscos aos operadores e minimiza danos aos equipamentos (MAMEDE FILHO, 2013).

Para os alimentadores dos transformadores de 6,6 kV, foram configuradas funções de proteção de sobrecorrente de fase (50/51) e de neutro (50N/51N), assegurando atuação seletiva em casos de sobrecorrente ou falta à terra. Além disso, foram aplicadas proteções térmicas (49) que supervisionam o aquecimento dos condutores e enrolamentos dos transformadores, prevenindo danos por sobrecarga prolongada. Em complemento, a implementação da função de falha de disjuntor (50BF) garante a eliminação da falta mesmo em casos de falha mecânica na abertura do disjuntor principal, promovendo o disparo automático do disjuntor a montante e garantindo a integridade do sistema (MAMEDE FILHO, 2013).

Outro avanço relevante foi a introdução da supervisão de disjuntor (52CS) e da detecção de subtensão (27) e sobretensão (59), permitindo o monitoramento contínuo das condições de operação e a atuação preventiva em situações anormais de tensão (MAMEDE FILHO, 2013).

Outra melhoria fundamental no novo arranjo da cabine foi a substituição da seccionadora de entrada por um disjuntor de média tensão, instalado a montante dos alimentadores. Essa modificação trouxe ganhos expressivos em segurança, flexibilidade operacional e seletividade (MAMEDE FILHO, 2013). Diferentemente da seccionadora, que apenas permitia o seccionamento manual do circuito, o disjuntor possibilita o desligamento automático em caso de falha, atuando de forma coordenada com os relés de proteção instalados nos alimentadores e transformadores. Dessa forma, a coordenação entre as proteções de montante e jusante passou a ser efetiva, permitindo o isolamento seletivo das faltas sem comprometer a continuidade de operação dos demais circuitos. Além disso, o disjuntor de entrada serve como elemento de backup para as proteções dos alimentadores, garantindo que, em caso

de falha na abertura de um disjuntor de saída, a falta ainda seja eliminada de forma segura e controlada, reforçando a confiabilidade e a integridade do sistema elétrico da cabine de 6,6 kV.

A instalação de sensores de temperatura nos cabos e barramentos permite o acompanhamento em tempo real das condições térmicas, possibilitando a identificação precoce de pontos de aquecimento excessivo, o que contribui diretamente para a manutenção preditiva e para o aumento da vida útil dos equipamentos (MAMEDE FILHO, 2013).

Também foram incluídos botões de emergência em cada cubículo, permitindo o desligamento imediato em situações de risco, conforme previsto na NBR 14039, item 4.1.5.1.

> Se for necessário, em caso de perigo, desenergizar um circuito, deve ser instalado um dispositivo de desligamento de emergência, facilmente identificável e rapidamente manobrável.

Todos os comandos, sinais e status dos cubículos foram integrados ao sistema supervisório SCADA, permitindo monitoramento e operação remotos, com registro de eventos, alarmes e oscilografias de todas as faltas registradas pelos relés REF615 da ABB. Essa integração assegura uma operação mais segura, análise detalhada de ocorrências e uma gestão eficiente da manutenção, promovendo redução de tempos de parada, aumento da confiabilidade e plena conformidade com as normas de segurança vigentes. O resultado representa uma evolução significativa em relação à configuração original da cabine, tanto em termos de seletividade quanto de desempenho e continuidade operacional (MAMEDE FILHO, 2013).

10 RESULTADOS OBTIDOS

10.1 SEGURANÇA

A substituição dos cubículos de média tensão representou uma melhoria significativa na segurança operacional da instalação, eliminando riscos associados à tecnologia obsoleta (BRASIL, 2019). A adoção de disjuntores a vácuo no lugar dos antigos modelos a óleo aumentou a confiabilidade e reduziu a necessidade de manutenção, além de eliminar o risco de vazamento e incêndio. Paralelamente, a instalação de proteções contra arco interno em todos os cubículos garante detecção imediata e atuação automática, isolando rapidamente a falha e protegendo tanto os equipamentos quanto os operadores (ABNT, 2021).

Os relés digitais ABB REF615 passaram a desempenhar um papel essencial na proteção do sistema, oferecendo funções de sobrecorrente, falta à terra, falha de disjuntor e supervisão térmica, além de comunicação direta com o sistema supervisório. Essa configuração possibilitou atuação seletiva e precisa, assegurando que apenas o circuito afetado seja desligado, o que reduz significativamente o impacto das faltas e aumenta a disponibilidade do sistema elétrico (MAMEDE FILHO, 2013).

As características construtivas dos novos cubículos, como compartimentação metálica, sensores de arco e disjuntores a vácuo, influenciam diretamente na redução da energia incidente em caso de falha, limitando os efeitos térmicos e mecânicos do arco elétrico (ABNT, 2025). Essa diminuição da energia incidente reduz também a exposição do operador a riscos elétricos, proporcionando um ambiente de trabalho mais seguro e em conformidade com as normas NR-10 e NBR 14039. Além disso, a integração ao supervisório garante registro de eventos, alarmes imediatos e resposta rápida a anomalias, consolidando a segurança e a confiabilidade operacional da nova cabine.

10.2 CONFIABILIDADE E DISPONIBILIDADE

A substituição do cubículo de média tensão trouxe melhorias expressivas em termos de confiabilidade e disponibilidade do sistema elétrico industrial. A atualização tecnológica, com a instalação de disjuntores a vácuo de alta performance e relés de proteção microprocessados, proporcionou um avanço substancial na eficiência

operacional e na segurança do fornecimento de energia. Esses equipamentos modernos apresentam maior precisão, resposta mais rápida e menor necessidade de manutenção em comparação aos dispositivos antigos, o que reduz significativamente a probabilidade de falhas imprevistas e paradas não programadas (MAMEDE FILHO, 2013). Dessa forma, o fornecimento de energia aos transformadores e alimentadores tornou-se mais contínuo, seguro e previsível, atendendo melhor às exigências de processos industriais críticos.

Outro fator determinante para o aumento da confiabilidade foi a melhoria da coordenação e seletividade das proteções. Com o novo sistema, qualquer ocorrência de curto-circuito ou sobrecorrente é isolada de forma precisa e localizada, impedindo a propagação da falha para outras partes da instalação. Essa característica é essencial para garantir que os demais circuitos e equipamentos permaneçam operando normalmente, evitando desligamentos totais e assegurando a continuidade do processo produtivo (ABNT, 2025).

Além disso, a integração de tecnologias de monitoramento contínuo e automação contribuiu diretamente para elevar o nível de disponibilidade do sistema. A supervisão em tempo real via protocolo IEC 61850 e a integração completa dos relés de proteção possibilitam o acompanhamento detalhado de variáveis elétricas e condições de operação (IEC, 2013). Recursos como a medição de temperatura dos cabos, o monitoramento de eventos e os alarmes de proteção contra arco interno permitem identificar precocemente anomalias, facilitando ações preventivas e intervenções rápidas antes que ocorram falhas maiores (ABNT, 2025).

Esses avanços também reduziram significativamente o tempo de manutenção corretiva, já que o diagnóstico remoto e a comunicação inteligente entre dispositivos agilizam a identificação das causas de eventuais falhas. Como consequência, há uma redução no tempo médio de indisponibilidade (MTTR) e um aumento no tempo médio entre falhas (MTBF), indicadores que refletem diretamente a confiabilidade do sistema elétrico (MAMEDE FILHO, 2013).

A combinação de todos esses fatores — novos equipamentos, proteção seletiva, automação integrada e monitoramento avançado — resultou em uma operação mais estável, previsível e segura. O sistema passou a apresentar maior disponibilidade e manutenção mais eficiente, além de atender aos requisitos de segurança elétrica definidos pela NR10, que estabelece que as instalações devem operar em condições seguras e possuir sistemas de proteção atualizados (BRASIL,

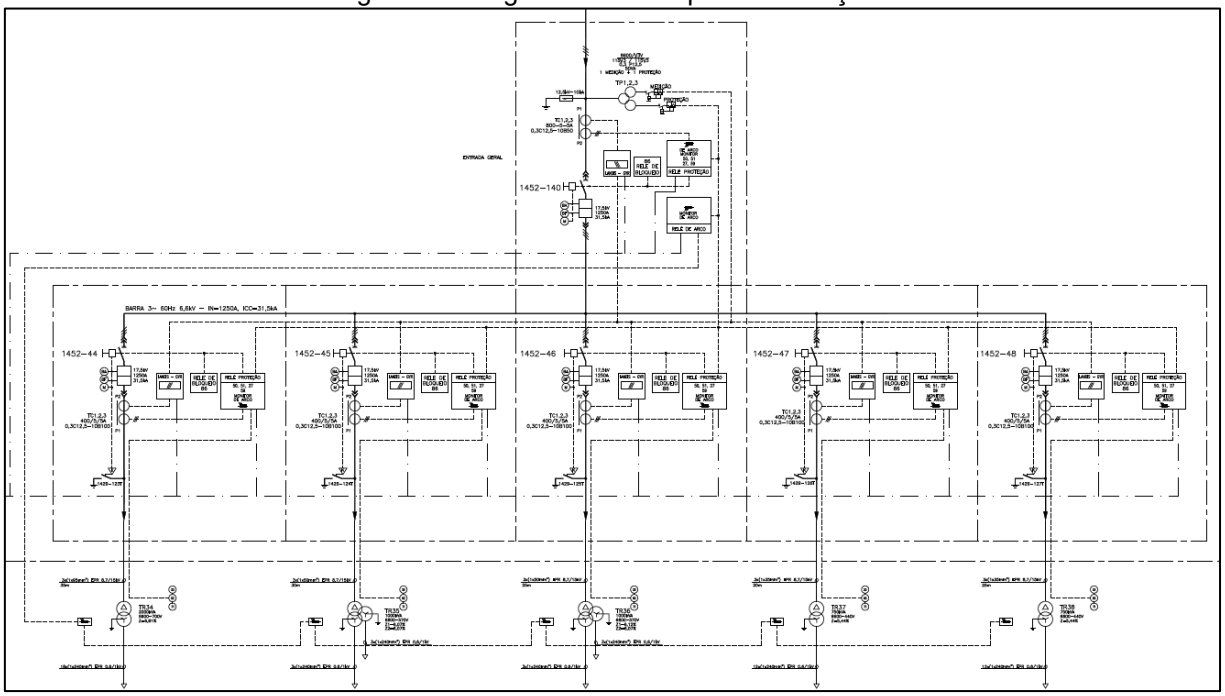
2019). Comparativamente à cabine antiga, que apresentava riscos operacionais, desgaste de componentes e limitações tecnológicas, o novo conjunto oferece um desempenho superior e uma base sólida para futuras expansões e integrações no contexto da Indústria 4.0.

10.3 CONFIGURAÇÃO DA NOVA CABINE

A cabine de média tensão foi completamente modernizada, passando de uma configuração antiga, com disjuntores obsoletos e relés primários de retardo por óleo, para uma instalação de alta confiabilidade composta por seis colunas totalmente equipadas com disjuntores a vácuo de última geração, relés digitais de proteção e sistemas de monitoramento integrados (demonstrados na figura 21). Essa atualização proporcionou maior confiabilidade e segurança operacional, atendendo plenamente às normas vigentes, como a NBR IEC 62271-200 (ABNT, 2025), NBR 14039 (ABNT, 2021), NR-10 (BRASIL, 2019) e IEEE 1584 (IEEE, 2018).

Cada coluna foi equipada com disjuntores a vácuo de acionamento motorizado, substituindo os antigos dispositivos a óleo que não atendiam aos requisitos de segurança contra arcos internos e falhas dielétricas (MAMEDE FILHO, 2013). A instalação desses disjuntores modernos permite operações de manobra mais rápidas e confiáveis, reduzindo drasticamente o risco de falhas elétricas e interrupções não planejadas no fornecimento de energia aos transformadores e alimentadores. Além disso, as colunas são projetadas para integração direta com protocolos de comunicação digital, como IEC 61850, facilitando a automação e o monitoramento remoto (MAMEDE FILHO, 2013).

Figura 21- Diagrama unifilar após substituição



Fonte: Elaboração própria

A atualização dos relés de proteção incluiu a implementação de dispositivos digitais multifuncionais que combinam funções de proteção contra sobrecorrente, curto-circuito e arco interno, com tempos de resposta otimizados e capacidade de armazenar eventos para diagnóstico pós-falha. A coordenação e seletividade das proteções foram recalculadas considerando a capacidade de corrente nominal de cada barramento e transformador, garantindo que qualquer falha seja isolada localmente, sem comprometer outros trechos do sistema (MAMEDE FILHO, 2013). O uso de relés digitais permite ainda integração total com supervisório, fornecendo sinais analógicos e digitais para supervisão em tempo real e permitindo a tomada de decisão baseada em dados precisos e imediatos.

Além disso, a cabine foi projetada com sistemas complementares de monitoramento, como sensores de temperatura nos cabos e de arco elétrico, assegurando a detecção precoce de condições anormais que poderiam comprometer a segurança e a continuidade operacional. O painel foi configurado para acesso frontal completo e a instalação inclui nobreaks dedicados para alimentação dos dispositivos de controle e proteção, garantindo operação contínua mesmo em caso de falha da rede de alimentação auxiliar (BRASIL, 2019).

Outro ponto relevante é a conformidade normativa, com segregação de barramentos, revestimento completo dos condutores, classificação de arco interno

adequada (IAC A FLR), grau de proteção IP4X externo e IP20 interno, seguindo rigorosamente os critérios da NBR IEC 62271-200 e NBR 14039. Essa abordagem reduz significativamente os riscos de arco elétrico e de contato acidental, além de facilitar a manutenção preventiva e corretiva, aumentando a segurança do operador e a disponibilidade do sistema (ABNT, 2021; MAMEDE FILHO, 2013).

11 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A substituição dos cubículos de média tensão de 6,6 kV analisada neste estudo evidenciou a importância da modernização de sistemas elétricos industriais sob os aspectos de segurança, confiabilidade e conformidade normativa. O diagnóstico do sistema original revelou deficiências significativas, como a presença de disjuntores a óleo e relés eletromecânicos, ausência de segregações internas adequadas e inexistência de integração digital entre dispositivos de proteção (ABNT, 2025). Essas características resultavam em baixa seletividade, riscos elevados de arco elétrico e não conformidade com normas como a NR-10 e a NBR 14039, comprometendo a operação segura e contínua da instalação.

A implantação da nova cabine representou uma transformação substancial na filosofia de proteção e automação da planta. A adoção de disjuntores a vácuo, relés digitais multifunção e sistemas de comunicação baseados na norma IEC 61850 garantiu maior precisão na detecção e eliminação de falhas, promovendo coordenação e seletividade entre os alimentadores e o circuito de entrada (ABNT, 2025). As proteções de falha de disjuntor, arco elétrico e sobrecorrente temporizada asseguram que apenas o trecho afetado pela falha seja isolado, preservando a continuidade de operação dos demais circuitos e reduzindo o tempo de indisponibilidade do sistema.

A modernização também resultou em avanços expressivos na segurança operacional. O uso de compartimentações testadas segundo a IEC 62271-200, sensores de arco, nobreaks dedicados e supervisão em tempo real proporcionou significativa redução dos riscos associados à energia incidente. Essa melhoria garante proteção mais eficaz aos operadores e aos equipamentos, alinhando a instalação aos padrões atuais de engenharia elétrica e às melhores práticas internacionais (ABNT, 2025).

Do ponto de vista da confiabilidade, a integração de sistemas digitais de supervisão e controle permitiu o monitoramento contínuo de grandezas elétricas, o registro de eventos e a análise de falhas com base em dados precisos. Essa capacidade de diagnóstico contribui para a manutenção preditiva e para a redução dos indicadores de falha, resultando em maior disponibilidade da planta e otimização dos recursos de manutenção (O SETOR ELÉTRICO, 2025). Além disso, o novo

arranjo oferece flexibilidade para futuras expansões e integração com tecnologias da Indústria 4.0, assegurando longevidade e escalabilidade ao sistema elétrico.

Em termos econômicos e operacionais, o projeto demonstrou que investimentos em modernização de cubículos não devem ser vistos apenas como substituição de equipamentos antigos, mas como uma estratégia de valorização do ativo elétrico (O SETOR ELÉTRICO, 2025). A redução de paradas não programadas, o aumento da vida útil dos componentes e a mitigação de riscos de acidentes refletem diretamente em ganhos de produtividade, segurança e sustentabilidade.

Conclui-se, portanto, que a modernização dos cubículos de média tensão constitui uma medida fundamental para garantir a operação segura, eficiente e em conformidade com as normas técnicas vigentes (BRASIL, 2019). O estudo comprovou que a aplicação de tecnologias modernas de proteção e automação promove um ambiente mais confiável e seguro, reforçando a importância de projetos de atualização tecnológica contínuos no setor elétrico industrial (ABNT, 2025). O caso analisado serve como referência prática para futuras iniciativas de modernização, demonstrando que a combinação de diagnóstico técnico, conformidade normativa e inovação tecnológica é essencial para a evolução e sustentabilidade das instalações elétricas de média tensão.

REFERÊNCIAS

MAMEDE FILHO, João. Manual de equipamentos elétricos. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MAMEDE FILHO, João. Proteção de sistemas elétricos de potência. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 14039: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV.* Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

BRASIL. Norma Regulamentadora nº 10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Ministério do Trabalho e Emprego. Brasília, 2019. Disponível em: https://www.gov.br/trabalho-e-emprego/pt-br/assuntos/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-10. Acesso em: 3 out. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17227: Arco elétrico — Gerenciamento de risco de energia incidente, precauções e métodos de cálculo. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR IEC 62271-200: Conjuntos de manobra e comando de alta tensão – Parte 200: Conjunto de manobra e comando de alta tensão para corrente alternada em invólucro metálico para tensões nominais acima de 1 kV até e inclusive 52 kV. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

O Setor Elétrico. Capítulo I – Conjuntos de manobra e controle em alta tensão. Edição 144. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/Ed-144-Fasc%C3%ADculo-Capitulo-I-Conjuntos-de-manobra-e-controle-em-alta-tensao.pdf. Acesso em: 5 out. 2025.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61850 — Communication networks and systems for power utility automation. Geneva: IEC, 2019.

O SETOR ELÉTRICO. Os ganhos da automação de subestações segundo a IEC 61850 para a indústria. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/os-ganhos-da-automacao-de-subestacoes-segundo-a-iec-61850-para-a-industria/. Acesso em: 5 out. 2025.

IEEE. *IEEE 1584-2018: Guide for performing arc-flash hazard calculations*. Piscataway, NJ: IEEE, 2018. Disponível em: https://standards.ieee.org/ieee/1584/5802/. Acesso em: 17 out. 2025.

O SETOR ELÉTRICO. Equipamentos para Subestações de T&D Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/documentos/fasciculos/ed-115_Fasciculo_Cap-VIII-Equipamentos-para-subestacoes-de-T&D.pdf. Acesso em: 1 nov. 2025.

O SETOR ELÉTRICO. Conjuntos de manobra e controle de potência. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2014/04/ed-

98_Fasciculo_Cap-III-Conjuntos-de-manobra-e-controle-de-potencia.pdf Acesso em: 1nov. 2025