

INTEGRAÇÃO ENTRE ENGENHARIA ELÉTRICA E GERENCIAMENTO DE PROJETOS NO DESENVOLVIMENTO DE PAINÉIS DE MÉDIA TENSÃO PARA O SETOR SUCROENERGÉTICO COLOMBIANO

João Gabriel de Campos, Maro Jinbo

Instituto Federal de Santa Catarina

Câmpus Jaraguá do Sul – Rau – Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica

e-mail: campoosgj@gmail.com, maro@ifsc.edu.br

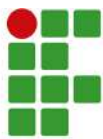
Trabalho de Conclusão de Curso – 29/06/2026

Resumo – O presente trabalho analisa e documenta o processo de desenvolvimento, gerenciamento e fabricação de um conjunto de 14 colunas de painéis de média tensão modulares, isolados a ar, destinados ao setor sucroenergético colombiano, com foco na integração entre soluções eletrotécnicas e práticas estruturadas de gerenciamento de projetos. A pesquisa caracteriza-se como aplicada e qualitativa, desenvolvida por meio do método de estudo de caso, tendo como objeto um projeto real de exportação conduzido por um fabricante internacional de sistemas elétricos e de automação. O conjunto fornecido foi estruturado em três grupos funcionais, operando nos níveis de tensão de 13,2 kV e 4,16 kV, com capacidades de curto-circuito de 31,5 kA e 40 kA, respectivamente. A análise contemplou as etapas de levantamento de requisitos técnicos e regulatórios, desenvolvimento do projeto eletromecânico, gerenciamento do projeto, fabricação dos equipamentos e validação por meio do Teste de Aceitação em Fábrica (FAT), concluído sem não conformidades registradas. Foram abordados aspectos técnicos relevantes, como dimensionamento de barramentos, análise de curto-circuito, parametrização de relés digitais multifuncionais de proteção de transformadores — com destaque para a proteção diferencial (ANSI 87T) e a detecção de inrush (ANSI 68) — e integração de dispositivos ao protocolo IEC 61850 para monitoramento e gestão de ativos elétricos. Do ponto de vista gerencial, o projeto foi conduzido com base nas práticas do *Project Management Institute* (PMI), com ênfase na gestão de riscos regulatórios associados ao Regulamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE 2024), norma colombiana aplicada pela primeira vez neste fornecimento, e no controle da cadeia de suprimentos para componentes com certificação específica. Os resultados evidenciam que a aplicação integrada de fundamentos da engenharia elétrica e de metodologias estruturadas de gerenciamento de projetos contribui significativamente para a confiabilidade, a segurança e a eficiência operacional de sistemas de média tensão em contextos de exportação. Conclui-se que essa integração constitui fator determinante para o sucesso de projetos industriais complexos, especialmente diante de exigências regulatórias internacionais inéditas.

Palavras-chave – Média Tensão; Painéis Elétricos; Proteção de Transformadores; Gerenciamento de Projetos; RETIE; IEC 62271-200.

INTEGRATION BETWEEN ELECTRICAL ENGINEERING AND PROJECT MANAGEMENT IN THE DEVELOPMENT OF MEDIUM-VOLTAGE SWITCHGEAR FOR THE COLOMBIAN SUGARCANE ENERGY SECTOR

Abstract – This work analyzes and documents the development, management, and manufacturing processes of a set of fourteen modular, air-insulated medium-voltage switchgear columns intended for the Colombian sugarcane energy sector, with a focus on the integration between electrotechnical solutions and structured project management practices. The research is characterized as applied and qualitative, conducted through the case study method, based on a real export project carried out by an international manufacturer of electrical and automation systems. The supplied set was organized into three functional groups, operating at voltage levels of 13.2 kV and 4.16 kV, with short-circuit capacities of 31.5 kA and 40 kA, respectively. The analysis covered the stages of technical and regulatory requirements definition, electromechanical design development, project management, equipment manufacturing, and validation through a Factory Acceptance Test (FAT), completed without any recorded non-conformities. Relevant technical aspects were addressed, including busbar sizing, short-circuit analysis, configuration of multifunction digital protection relays for transformers — with emphasis on differential protection (ANSI 87T) and inrush current detection (ANSI 68) — and integration of devices via the IEC 61850 protocol for electrical asset monitoring and management. From a project management perspective, the project was conducted in accordance with the practices of the Project Management Institute (PMI), with particular emphasis on the management of regulatory risks associated



with the Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE 2024), a Colombian regulation applied for the first time in this supply, and on supply chain control for components requiring specific certification. The results demonstrate that the integrated application of electrical engineering fundamentals and structured project management methodologies contributes significantly to the reliability, safety, and operational efficiency of medium-voltage systems in export-oriented contexts. It is concluded that this integration is a determining factor for the success of complex industrial projects, especially when facing unprecedented international regulatory requirements.

Keywords – Medium Voltage; Electrical Switchgear; Transformer Protection; Project Management; RETIE; IEC 62271-200.

I. INTRODUÇÃO

O setor sucroenergético, especialmente no contexto colombiano, demanda sistemas de distribuição de energia elétrica com elevados níveis de confiabilidade e segurança, a fim de garantir a continuidade dos processos industriais que abrangem desde a moagem da cana-de-açúcar até a cogeração de energia elétrica. Nesse cenário, a infraestrutura de média tensão configura-se como elemento crítico, sendo responsável pela distribuição eficiente de potência em plantas industriais de grande porte, nas quais a interrupção do fornecimento de energia implica perdas operacionais significativas [1].

O presente Trabalho de Conclusão de Curso analisa o projeto, o gerenciamento e a fabricação de um conjunto composto por 14 colunas de painéis de média tensão modulares, isolados a ar, destinados a um cliente do setor sucroenergético na Colômbia, no âmbito de um projeto real de exportação conduzido por um fabricante internacional de sistemas elétricos e de automação. O conjunto foi estruturado em três grupos funcionais, operando nos níveis de tensão de 13,2 kV e 4,16 kV, com capacidades de suportabilidade a curto-circuito de 31,5 kA e 40 kA, respectivamente, refletindo a diversidade de aplicações dentro de uma mesma planta industrial de elevada criticidade.

A complexidade do projeto apresenta caráter multifacetado, envolvendo tanto o rigor técnico da Engenharia Elétrica quanto a aplicação de princípios estruturados de Gerenciamento de Projetos [2]. Sob o aspecto técnico, a solução incorpora tecnologias avançadas de proteção e digitalização, com destaque para relés digitais multifuncionais de proteção de transformadores, parametrizados com funções como a proteção diferencial (ANSI 87T) e a detecção de corrente de inrush (ANSI 68), e para a integração dos equipamentos via protocolo IEC 61850, em consonância com os paradigmas da Indústria 4.0 [3]. Sob a perspectiva gerencial, o projeto foi conduzido com base na metodologia do *Project Management Institute* (PMI), exigindo controle rigoroso de escopo, prazo, qualidade e conformidade com normas internacionais [2].

O principal desafio do estudo de caso consistiu na necessidade de conciliar as normas técnicas internacionais adotadas pelo fabricante, em especial a IEC 62271-200 [4], com as exigências regulatórias do país de destino, particularmente o Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) em sua edição de 2024 [5]. Este projeto representou o primeiro fornecimento conduzido sob os requisitos da nova edição da norma colombiana, condição que ampliou significativamente os desafios associados à qualificação de fornecedores, à certificação de materiais e à gestão de riscos da cadeia de suprimentos.

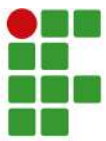
Diante desse cenário, formula-se a seguinte questão norteadora: como a aplicação integrada de uma metodologia estruturada de gerenciamento de projetos, aliada ao domínio de soluções eletrotécnicas avançadas, pode assegurar a conformidade técnica e o sucesso na entrega de um projeto complexo de painéis de média tensão destinados à exportação, mesmo diante de exigências regulatórias específicas e inéditas?

O objetivo geral deste trabalho consiste em analisar e documentar o processo de gerenciamento do projeto e a solução eletrotécnica implementada, com ênfase na verificação da conformidade técnica e na aplicação da metodologia de gerenciamento de projetos como estratégia de mitigação de riscos associados à exportação e à cadeia de suprimentos. De forma complementar, busca-se: descrever a arquitetura e os critérios de projeto eletrotécnico dos painéis, incluindo as soluções de proteção e digitalização adotadas; realizar uma análise comparativa entre os requisitos das normas IEC e as regulamentações colombianas RETIE/NTC, com foco no impacto das exigências de certificação; e avaliar a contribuição das soluções de integração digital para a gestão de ativos do cliente final.

Este estudo justifica-se por sua relevância em três dimensões complementares. No âmbito acadêmico, pela integração entre Engenharia Elétrica e Gerenciamento de Projetos em um estudo de caso aplicado, contribuindo para a discussão sobre a formação multidisciplinar do engenheiro [6]. No campo profissional, pela documentação de um processo de exportação de equipamentos de média tensão sob uma norma regulatória inédita, tema de crescente relevância para a indústria eletrotécnica nacional. E, sob a perspectiva técnica, pela análise de desafios regulatórios específicos do mercado colombiano, oferecendo subsídios para futuros projetos internacionais no setor elétrico industrial [5].

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A execução de projetos industriais de média tensão em contexto de exportação mobiliza, de forma simultânea e interdependente, conhecimentos provenientes da engenharia eletrotécnica, da conformidade normativa internacional e da gestão estruturada de projetos. A compreensão integrada dessas três dimensões é condição necessária para a análise do estudo de caso apresentado neste trabalho. Esta seção organiza os fundamentos teóricos que sustentam a metodologia adotada e a interpretação dos resultados obtidos, estruturados



nos seguintes temas: sistemas de média tensão e conjuntos de manobra; dimensionamento eletrotécnico e análise de curto-circuito; sistemas de proteção e seletividade; ensaios elétricos e garantia da qualidade; digitalização e integração de sistemas; conformidade normativa e projetos internacionais; e gerenciamento de projetos aplicado à engenharia elétrica.

A. Sistemas de Média Tensão e Conjuntos de Manobra e Controle

Os conjuntos de manobra e controle de média tensão (CMCMT) constituem o núcleo responsável pela distribuição, proteção e controle da energia elétrica em instalações industriais de grande porte. Esses equipamentos são projetados para operar em tensões superiores a 1 kV, sendo aplicados em diferentes níveis de distribuição dentro de uma mesma planta — condição presente neste estudo de caso, no qual o sistema opera em dois níveis de tensão distintos: 13,2 kV e 4,16 kV [4].

A norma de referência para esses equipamentos é a IEC 62271-200, adotada no Brasil como ABNT NBR IEC 62271-200, que estabelece requisitos técnicos para conjuntos de manobra e controle de média tensão com isolamento a ar ou a gás. Essa norma define critérios fundamentais relacionados ao desempenho térmico sob corrente nominal, à suportabilidade a correntes de curto-circuito e, de forma particularmente relevante para projetos industriais, à classificação de arco interno (IAC — *Internal Arc Classification*). A classificação IAC define a capacidade dos painéis de conter os efeitos de uma falha interna, protegendo os operadores contra a liberação de energia térmica e mecânica decorrente da ocorrência de arco elétrico. As categorias AFL e AFLR distinguem os níveis de proteção oferecidos em diferentes faces do equipamento, sendo a classificação AFLR a mais abrangente, por contemplar todas as faces acessíveis [4].

A configuração modular dos painéis oferece vantagens operacionais significativas em instalações industriais de grande porte, permitindo a expansão, a manutenção independente por coluna e a padronização construtiva entre diferentes grupos funcionais. Em arranjos compostos por múltiplas colunas — como o conjunto de 14 colunas objeto deste estudo —, a modularidade facilita a fabricação seriada e a realização de ensaios individuais, sem comprometer a integridade do sistema quando interligado [4].

B. Dimensionamento Eletrotécnico e Análise de Curto-Circuito

O dimensionamento dos componentes de um conjunto de manobra de média tensão deve considerar dois regimes de operação distintos: o regime nominal contínuo, no qual os condutores e barramentos são avaliados quanto à elevação de temperatura; e o regime de falta, no qual os mesmos elementos são submetidos a esforços eletrodinâmicos e térmicos de elevada magnitude [4].

A análise de curto-circuito é a ferramenta fundamental para a determinação dos níveis máximos de corrente de falta aos quais o sistema pode ser submetido. A corrente de curto-circuito

simétrica trifásica representa o cenário mais severo do ponto de vista eletrodinâmico, e sua determinação, combinada com o fator de assimetria aplicável, permite o cálculo da corrente de pico que os barramentos devem suportar sem deformações permanentes. Os níveis de curto-circuito definem diretamente a capacidade de interrupção exigida dos disjuntores, parâmetro que varia conforme o nível de tensão do sistema [4].

A coordenação de isolamento constitui aspecto complementar ao dimensionamento, sendo responsável por assegurar que os equipamentos suportem as solicitações dielétricas decorrentes de sobretensões transitórias de origem atmosférica ou de manobra. A definição do nível básico de isolamento (BIL — *Basic Insulation Level*) estabelece a capacidade dos equipamentos de resistir a esses esforços sem ocorrência de falhas dielétricas [4].

Para a verificação quantitativa do dimensionamento dos barramentos, três critérios complementares devem ser satisfeitos: a capacidade de condução de corrente em regime nominal, a suportabilidade térmica frente à corrente de curto-circuito e a suportabilidade eletrodinâmica aos esforços mecânicos decorrentes do valor de pico da corrente de falta.

O critério de ampacidade relaciona a corrente nominal I_n à seção transversal mínima do condutor A_{min} por meio da densidade de corrente admissível J , parâmetro que depende do material condutor, das condições de ventilação e da elevação de temperatura admissível [1]:

$$A_{min} = \frac{I_n}{J} \quad (1)$$

Para barramentos de cobre instalados em ambiente interno com ventilação natural, valores típicos de J situam-se entre 1,0 e 1,6 A/mm² [1].

A corrente de pico de curto-circuito i_p , que define o esforço eletrodinâmico máximo ao qual o barramento é submetido, relaciona-se à corrente de curto-circuito simétrica I_k'' por meio de um fator multiplicativo n , definido pela IEC 62271-200 em função da magnitude da corrente de curto-circuito nominal [4]:

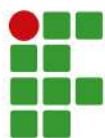
$$i_p = n \cdot I_k'' \quad (2)$$

sendo $n = 2,5$ para correntes de curto-circuito nominais até 25 kA e $n = 2,6$ para correntes entre 25 kA e 50 kA [4].

A suportabilidade térmica ao curto-circuito determina a seção mínima do barramento S_{min} necessária para que a temperatura do condutor não exceda o limite admissível durante a duração nominal da falta t_k , conforme a equação adiabática de suportabilidade térmica [7]:

$$S_{min} = \frac{I_{th} \sqrt{t_k}}{k} \quad (3)$$

onde I_{th} é a corrente térmica equivalente de curto-circuito (aproximada pela corrente simétrica para faltas de curta duração) e k é uma constante que depende do material condutor, assumindo o valor de 143 A·s^{0,5}/mm² para barramentos de cobre [7].



Por fim, o esforço eletrodinâmico por unidade de comprimento F , exercido entre condutores paralelos percorridos pela corrente de pico, é dado por [7]:

$$F = 0,2 \cdot \frac{i_p^2}{d} \quad (4)$$

onde i_p é expresso em quiloampères, d é a distância entre eixos dos condutores em metros e F resulta em newtons por metro. Esse esforço deve ser verificado frente à resistência mecânica do barramento e de seus suportes isolantes, de modo a evitar deformações permanentes ou falhas nos pontos de fixação.

C. Sistemas de Proteção, Seletividade e Segurança Operacional

A proteção de sistemas elétricos de média tensão é um dos pilares fundamentais para a operação segura e contínua de instalações industriais. O princípio da seletividade estabelece que, diante de uma condição de falha, apenas o dispositivo de proteção mais próximo ao ponto defeituoso deve atuar, isolando o menor trecho possível do sistema e preservando a continuidade das demais cargas [8]. A implementação desse princípio exige a coordenação precisa entre os dispositivos de proteção de diferentes níveis do sistema, realizada por meio da análise de curvas tempo-corrente e da parametrização hierárquica dos equipamentos.

Os relés digitais multifuncionais modernos representam um avanço substancial em relação aos dispositivos eletromecânicos, integrando em um único equipamento diversas funções de proteção padronizadas pelo sistema ANSI/IEEE. Para a proteção de transformadores de potência, as funções mais relevantes são a proteção diferencial (ANSI 87T), considerada a principal defesa contra faltas internas; a proteção de sobrecorrente de fase (ANSI 50/51) e de neutro (ANSI 50N/51N), responsáveis pela detecção de faltas externas; a proteção de sobrecarga térmica (ANSI 49); e a detecção de corrente de inrush por segundo harmônico (ANSI 68), essencial para evitar atuações indevidas da proteção diferencial durante a energização do transformador [9].

A proteção diferencial (ANSI 87T) merece atenção especial por sua relevância e complexidade de parametrização. Esse princípio de proteção baseia-se na comparação entre as correntes nos enrolamentos primário e secundário do transformador: em condições normais de operação, a diferença entre essas correntes — devidamente compensadas em módulo e fase — é nula ou desprezível; na ocorrência de uma falta interna, essa diferença cresce abruptamente, provocando a atuação instantânea do relé. A correta configuração da restrição de inrush é condição indispensável para a confiabilidade dessa função, uma vez que a corrente de magnetização transitória na energização pode apresentar valores elevados e assimétricos, semelhantes aos de uma falta, caso os parâmetros de bloqueio não estejam adequadamente ajustados [9].

A detecção de arco elétrico interno representa um recurso adicional de segurança operacional disponível nos relés digitais modernos. O arco elétrico interno é caracterizado pela liberação

abrupta de elevadas quantidades de energia térmica e luminosa, capaz de provocar danos severos aos equipamentos e riscos à integridade física dos operadores. Sistemas de detecção baseados em sensores ópticos permitem a identificação do arco em tempos inferiores a 1 ms, viabilizando a atuação ultrarrápida dos disjuntores e a redução significativa da energia incidente liberada durante o evento [4].

D. Ensaios Elétricos e Garantia da Qualidade

A norma IEC 62271-200 estabelece dois tipos de ensaios para conjuntos de manobra de média tensão: os ensaios de tipo e os ensaios de rotina. Os ensaios de tipo têm como finalidade comprovar o desempenho do projeto construtivo do equipamento, sendo realizados uma única vez em um protótipo representativo e válidos para toda a família de produtos que compartilha a mesma arquitetura. Entre os ensaios de tipo mais relevantes destacam-se o ensaio de elevação de temperatura, que valida a capacidade térmica dos barramentos sob corrente nominal; o ensaio de suportabilidade a curto-circuito, que verifica a integridade mecânica e elétrica das colunas frente aos esforços de falta; e o ensaio de arco interno (IAC), que certifica a capacidade de contenção dos efeitos de falhas internas [4].

Os ensaios de rotina, por sua vez, são aplicados individualmente a cada equipamento fabricado, com o objetivo de verificar a conformidade da unidade produzida em relação ao projeto validado pelos ensaios de tipo. Os ensaios de rotina típicos para painéis de média tensão incluem a medição de resistência de contato dos circuitos principais, o ensaio de tensão suportável à frequência industrial, os testes de continuidade e isolamento dos circuitos auxiliares, e a verificação funcional dos mecanismos de operação mecânica e dos intertravamentos [4].

No contexto de projetos industriais, destacam-se adicionalmente os testes de aceitação, realizados de forma acordada entre fabricante e cliente. O Factory Acceptance Test (FAT) é conduzido nas instalações do fabricante e tem como objetivo verificar o funcionamento integrado do sistema em ambiente controlado, antes do despacho dos equipamentos. O Site Acceptance Test (SAT), realizado após a instalação e o comissionamento nas instalações do cliente, valida o desempenho do sistema em condições reais de operação [2].

E. Digitalização e Integração de Sistemas Elétricos

A incorporação de tecnologias digitais aos sistemas elétricos industriais tem promovido uma transformação substancial na forma como os ativos são monitorados, gerenciados e mantidos. Os relés digitais modernos, além de suas funções de proteção, funcionam como dispositivos eletrônicos inteligentes (IED — *Intelligent Electronic Device*), capazes de medir, registrar e comunicar dados elétricos em tempo real [3].

O protocolo IEC 61850, desenvolvido especificamente para automação de subestações e sistemas de proteção, representa o padrão internacional de referência para a comunicação entre dispositivos em sistemas elétricos. Sua arquitetura orientada a objetos e baseada em modelos de dados padronizados permite a

interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes, viabilizando a integração dos painéis de média tensão a plataformas digitais de supervisão e gestão de ativos [3].

A integração digital dos painéis a plataformas de monitoramento possibilita a coleta contínua de parâmetros elétricos — como correntes de fase, tensões, fator de potência, energia ativa e reativa — e o registro histórico de eventos de proteção e alarmes. Esse conjunto de dados viabiliza a transição de modelos de manutenção corretiva e preventiva para estratégias de manutenção baseada em condição, nas quais as intervenções são planejadas com base no estado real dos equipamentos, contribuindo para o aumento da disponibilidade operacional e a redução de custos ao longo do ciclo de vida dos ativos [3].

F. Conformidade Normativa e Projetos Internacionais

O desenvolvimento de sistemas elétricos destinados à exportação impõe a necessidade de conformidade simultânea com normas técnicas de diferentes jurisdições, condição que amplia significativamente a complexidade do projeto em relação a fornecimentos destinados ao mercado interno.

No Brasil, as instalações elétricas de média tensão são regulamentadas pela norma ABNT NBR 14039, que estabelece diretrizes para sistemas com tensões entre 1,0 kV e 36,2 kV, complementada pelas normas IEC adotadas pela ABNT para equipamentos específicos. Em âmbito internacional, as normas da International Electrotechnical Commission (IEC) constituem a referência global para o setor eletrotécnico, sendo amplamente adotadas por fabricantes e projetistas [10].

No caso específico da Colômbia, o principal instrumento regulatório é o Regulamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), de caráter obrigatório, que estabelece requisitos técnicos mínimos voltados à segurança de pessoas, animais e instalações elétricas. O RETIE é complementado pelas normas NTC 2050 e NTC 5720, que definem critérios relativos ao código elétrico colombiano e à aptidão de equipamentos de média tensão para uso nas instalações do país [5].

A versão do RETIE vigente em 2024 introduziu atualizações nos requisitos de certificação de materiais e componentes, com impacto direto sobre a especificação de cabos elétricos, isoladores e dispositivos de proteção. A obrigatoriedade de certificação por organismos acreditados impõe restrições ao universo de fornecedores habilitados, condição que, em projetos pioneiros sob uma nova edição da norma, pode resultar em disponibilidade limitada de insumos homologados e em prazos de qualificação mais longos do que os previstos inicialmente [5].

G. Gerenciamento de Projetos Aplicado à Engenharia Elétrica

A execução de projetos complexos em engenharia elétrica, especialmente em contextos internacionais, demanda a aplicação de metodologias estruturadas de gerenciamento capazes de integrar dimensões técnicas, logísticas, normativas e relacionais. O Guia PMBOK, publicado pelo Project Management Institute (PMI), oferece um conjunto consolidado de boas práticas

organizadas em áreas de conhecimento que abrangem escopo, cronograma, custos, qualidade, aquisições, riscos e partes interessadas [2].

No contexto de projetos de infraestrutura elétrica industrial, três áreas de conhecimento assumem relevância particular. A gestão do cronograma, por meio de técnicas como a análise do caminho crítico (CPM), permite a identificação das atividades que determinam diretamente o prazo de entrega, orientando a alocação de recursos e a definição de prioridades. A gestão de aquisições torna-se especialmente crítica em projetos com componentes de longo prazo de entrega (*long lead items*), como transformadores, disjuntores de média tensão e relés de proteção, cuja indisponibilidade pode comprometer toda a sequência de fabricação [2].

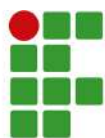
A gestão de riscos, por sua vez, envolve a identificação sistemática de eventos incertos que possam impactar os objetivos do projeto, seguida da análise de sua probabilidade e impacto e da definição de respostas adequadas. Em projetos de exportação, os riscos regulatórios — relacionados à conformidade com normas do país de destino — configuram-se como uma categoria específica, de elevado impacto potencial sobre o escopo, o cronograma e os custos, exigindo tratamento dedicado desde as fases iniciais do planejamento [2].

A integração entre domínio técnico e gestão estruturada configura-se, portanto, como fator crítico de sucesso em projetos industriais de média tensão destinados à exportação. O domínio eletrotécnico assegura a qualidade e a conformidade da solução entregue; a gestão estruturada garante que essa solução seja desenvolvida e entregue dentro das restrições de prazo, custo e qualidade estabelecidas contratualmente.

III. METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada de natureza qualitativa, desenvolvida por meio do método de estudo de caso. Conforme consolidado na literatura metodológica, o estudo de caso é adequado para investigações que buscam compreender fenômenos complexos em seu contexto real, especialmente quando as fronteiras entre o fenômeno estudado e o ambiente no qual ele se insere não são claramente definidas [6]. Essa característica se aplica diretamente ao objeto deste trabalho, no qual as dimensões técnica, normativa, logística e gerencial do projeto se interpoem de forma indissociável.

O objeto de estudo é o projeto, gerenciamento e fabricação de um conjunto de 14 colunas de painéis de média tensão modulares, isolados a ar, destinados a um cliente do setor sucroenergético na Colômbia, conduzido por um fabricante internacional de sistemas elétricos e de automação. O ciclo de vida analisado compreende desde a fase de levantamento de requisitos até a conclusão do Teste de Aceitação em Fábrica (FAT), etapa na qual os equipamentos foram validados e aprovados para despacho. O Site Acceptance Test (SAT), realizado nas instalações do cliente após o comissionamento,



situa-se fora do escopo deste trabalho em razão das restrições de acesso ao campo durante o período de desenvolvimento da pesquisa.

Os dados que fundamentam a análise foram coletados diretamente da execução do projeto pelo autor, que atuou como gerente de projetos responsável pelo acompanhamento de todas as fases descritas. Essa condição confere ao trabalho o caráter de observação participante, modalidade reconhecida em pesquisas aplicadas de engenharia, na qual o pesquisador integra o ambiente estudado e tem acesso direto às informações técnicas, decisões gerenciais e documentação produzida ao longo do projeto. As fontes primárias utilizadas incluem diagramas elétricos e mecânicos aprovados, cronogramas de projeto, matriz de riscos, relatórios de progresso, protocolos de ensaios de rotina e o relatório final do FAT.

A metodologia foi estruturada em cinco fases sequenciais, que refletem o fluxo real de execução do projeto e organizam a apresentação dos resultados obtidos.

A. Fase 1 — Levantamento de Requisitos Técnicos e Regulatórios

A fase inicial compreendeu o levantamento e a análise sistemática de todos os requisitos técnicos e regulatórios aplicáveis ao fornecimento. Dado o caráter internacional do projeto, essa etapa assumiu importância estratégica, uma vez que os equipamentos deveriam atender simultaneamente às normas técnicas internacionais adotadas pelo fabricante e às exigências obrigatórias do Regulamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), instrumento regulatório vigente na Colômbia.

O levantamento normativo abrangeu as seguintes referências técnicas: a norma IEC 62271-200, que estabelece requisitos para conjuntos de manobra e controle de média tensão, incluindo critérios de classificação de arco interno (IAC) [4]; a IEC 60076, aplicável a transformadores de potência [11]; a IEC 60255, que rege os relés de proteção [9]; e as normas colombianas complementares NTC 2050 e NTC 5720, que integram o arcabouço regulatório do RETIE [12], [13]. Em paralelo, foram analisadas as especificações técnicas fornecidas pelo cliente, contemplando parâmetros como tensão e corrente nominais, capacidade de interrupção em curto-circuito, arranjo físico das colunas, requisitos de proteção e automação, e condições ambientais de operação.

A convergência entre a análise normativa e as especificações contratuais permitiu a identificação das premissas e restrições do projeto. O ponto de maior impacto identificado nessa fase foi a obrigatoriedade de utilização de componentes com certificação específica conforme o RETIE 2024 [5], condição que impôs restrições à seleção de materiais e exerceu influência direta sobre o planejamento logístico e a gestão da cadeia de suprimentos.

B. Fase 2 — Desenvolvimento do Projeto Eletromecânico

A fase de engenharia compreendeu a concepção técnica detalhada dos painéis, integrando as disciplinas elétrica e mecânica de forma a garantir o atendimento integral aos

requisitos levantados na fase anterior.

No âmbito da engenharia elétrica, as atividades foram iniciadas com o dimensionamento de barramentos e condutores, fundamentado em cálculos de elevação de temperatura em regime nominal e de suportabilidade aos esforços eletrodinâmicos em regime de falta. Realizaram-se estudos de curto-circuito para determinação dos níveis máximos de corrente de falta em cada nível de tensão — 31,5 kA em 13,2 kV para as Tags 1 e 2, e 40 kA em 4,16 kV para a Tag 3 [4] —, resultados que subsidiaram diretamente a especificação dos disjuntores e o desenvolvimento da lógica de proteção. A parametrização dos relés digitais multifuncionais de proteção de transformadores foi conduzida com foco na seletividade e na rapidez de atuação, com atenção especial à configuração da proteção diferencial (ANSI 87T) e ao ajuste da detecção de corrente de inrush (ANSI 68), etapa reconhecidamente crítica para a prevenção de atuações indevidas durante a energização dos transformadores [9].

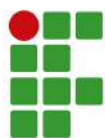
No âmbito da engenharia mecânica, foram desenvolvidos o projeto estrutural das 14 colunas modulares e o detalhamento do layout interno, com otimização da acessibilidade e da segurança operacional. Especial atenção foi dedicada ao projeto das barreiras internas e dos sistemas de alívio de pressão para contenção de arco interno, visando ao atendimento à classificação IAC conforme a IEC 62271-200 [4]. A integração entre as disciplinas assegurou que a disposição dos componentes elétricos respeitasse as distâncias de isolamento e os requisitos de ventilação, resultando em documentação técnica completa, composta por diagramas unifilares, trifásicos, lógicos e listas de materiais detalhadas.

C. Fase 3 — Gerenciamento do Projeto e Controle de Suprimentos

O gerenciamento do projeto foi conduzido com base nas práticas consolidadas do *Project Management Institute* (PMI), estruturadas no Guia PMBOK [2], com foco nas áreas de conhecimento de escopo, prazo, qualidade, aquisições e riscos.

A gestão do cronograma foi realizada por meio do monitoramento contínuo de marcos críticos (*milestones*), com destaque para: aprovação dos diagramas elétricos pelo cliente, liberação dos materiais de longo prazo (*long lead items*), início e conclusão da montagem eletromecânica, e realização do FAT. A técnica do caminho crítico (CPM) foi empregada para identificação das atividades com maior impacto sobre o prazo de entrega, orientando a priorização de recursos e ações preventivas [14].

A gestão de aquisições assumiu caráter estratégico em razão da exigência de certificação RETIE para determinados componentes [5]. O processo incluiu a qualificação de fornecedores habilitados a fornecer materiais certificados — em especial cabos de potência e de controle — e a implementação de *gates* de materiais, pontos de controle formais nos quais os certificados de conformidade eram verificados antes da liberação dos itens para a linha de produção.



A gestão de riscos foi aplicada de forma sistemática, com a elaboração de uma matriz de riscos contemplando eventos de diferentes naturezas: atrasos no fornecimento de *long lead items*, restrições de disponibilidade de componentes certificados RETIE, e eventuais inconsistências na documentação técnica ou aduaneira para exportação. Para cada risco identificado foram definidos planos de resposta classificados conforme as estratégias de mitigação, transferência ou aceitação, seguindo a estrutura proposta pelo PMBOK [2]. A comunicação entre as equipes de projeto, compras, produção e o cliente foi mantida por meio de relatórios de progresso semanais e reuniões de alinhamento técnico.

D. Fase 4 — Fabricação e Ensaios de Rotina

A fase de fabricação compreendeu a montagem eletromecânica das 14 colunas, seguida pela execução de um plano de ensaios de rotina individuais, aplicado a cada painel fabricado em conformidade com os requisitos da norma IEC 62271-200 [4].

Os ensaios de rotina realizados em cada coluna foram os seguintes:

- Medição de resistência de contato dos circuitos principais, por meio de micro-ohmímetro, para verificação da integridade das conexões de barramento;
- Ensaio de tensão suportável à frequência industrial (tensão aplicada), para verificação da integridade dielétrica do isolamento e das distâncias de escoamento;
- Ensaio de tensão induzida, aplicado às colunas com transformadores de medição incorporados;
- Testes de continuidade e isolamento de circuitos de controle e auxiliares, abrangendo toda a fiação secundária e os circuitos de comando;
- Verificação funcional dos mecanismos de operação mecânica e dos intertravamentos entre disjuntores, chaves terra e portas de acesso.

Os resultados de cada ensaio foram registrados em protocolos individuais por coluna, compondo a documentação de rastreabilidade de qualidade do fornecimento.

E. Fase 5 — Teste de Aceitação em Fábrica (FAT)

A fase final de validação foi conduzida por meio do Teste de Aceitação em Fábrica (FAT), realizado ao longo de cinco dias úteis com a presença de representantes técnicos do cliente colombiano. O FAT teve como objetivo verificar, em ambiente controlado de fábrica, a conformidade funcional e normativa do conjunto completo de 14 painéis interligados, constituindo a etapa formal de aceite do fornecimento antes do despacho para exportação.

O plano de testes do FAT foi estruturado para cobrir os seguintes aspectos: inspeção visual e dimensional; testes funcionais de disjuntores e seccionadoras em operação local e remota; verificação das lógicas de controle e intertravamentos, incluindo simulação de sequências de transferência de carga;

testes de injeção secundária nos relés de proteção, com verificação dos tempos de atuação das funções parametrizadas confrontados com as curvas de seletividade definidas na fase de engenharia; e validação da integração digital via protocolo IEC 61850 [3], confirmando a correta transmissão de dados de medição, eventos e alarmes para a plataforma de gestão de ativos.

A aprovação ou rejeição de cada item testado foi registrada em protocolo formal, assinado pelas partes ao término do FAT, constituindo o documento de aceite que autorizou o despacho dos equipamentos.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A presente seção expõe os resultados obtidos ao longo das etapas de engenharia, gerenciamento e validação do projeto, organizados de acordo com as fases metodológicas descritas na Seção 3. A análise integra aspectos técnicos, normativos e gerenciais, evidenciando a interdependência entre as disciplinas envolvidas e os principais desafios superados.

A. Caracterização Técnica do Fornecimento

O conjunto fornecido foi estruturado em três grupos funcionais, denominados Tags, diferenciados pelos níveis de tensão de operação, capacidades de curto-circuito e aplicações específicas dentro da planta sucroenergética. A Tabela I apresenta os parâmetros elétricos nominais de cada Tag.

As Tags 1 e 2 operam no nível de distribuição primária da planta, em 13,2 kV, e respondem por 12 das 14 colunas do fornecimento. A Tag 3, em 4,16 kV, destina-se à alimentação de cargas de menor nível de tensão, sendo projetada para suportar um nível de curto-circuito superior (40 kA), condição que impõe critérios mais rigorosos de dimensionamento eletrodinâmico dos barramentos e de especificação dos disjuntores [4].

Todos os painéis foram projetados com configuração trifásica acrescida de condutor de proteção (PE), isolados a ar e de estrutura modular, em conformidade com a norma IEC 62271-200. A corrente nominal de barramento de 1250 A foi definida como padrão para os três grupos, garantindo uniformidade construtiva e facilitando os procedimentos de fabricação e ensaio.

Em termos construtivos, as colunas modulares apresentaram largura individual entre 700 mm e 800 mm, a depender da função do compartimento (entrada/saída ou medição), altura total de aproximadamente 2,73 m a 2,80 m e profundidade entre 1,50 m e 1,65 m, dimensões compatíveis com a prática construtiva usual para conjuntos de manobra de média tensão isolados a ar dessa classe de corrente e tensão. As conexões de entrada e saída foram dimensionadas para acomodar até três condutores unipolares de 630 mm² em paralelo por fase, capacidade que confere margem adequada em relação à corrente nominal de 1250 A do barramento.

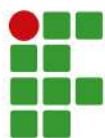


TABELA I
Parâmetros elétricos nominais por Tag

Tag	Colunas	Tensão (kV)	Corrente (A)	Icc (kA)	Freq. (Hz)
Tag 1	3	13,2	1250	31,5	60
Tag 2	9	13,2	1250	31,5	60
Tag 3	2	4,16	1250	40,0	60

Elaborado pelo autor.

B. Resultados da Fase de Engenharia Eletromecânica

1) *Dimensionamento de Barramentos e Análise de Curto-Circuito*: O dimensionamento dos barramentos foi realizado com base nos critérios de elevação de temperatura em regime nominal e de suportabilidade aos esforços eletrodinâmicos em regime de falta. Para as Tags 1 e 2 (13,2 kV, 31,5 kA), os barramentos foram especificados para suportar os esforços de pico de corrente de curto-circuito, calculados a partir da corrente de curto simétrica aplicando-se o fator de assimetria conforme a IEC 62271-200 [4]. Para a Tag 3 (4,16 kV, 40 kA), o nível de curto-circuito mais elevado determinou a adoção de seções de barramento com maior capacidade eletrodinâmica, além de fixações reforçadas para contenção dos esforços mecânicos decorrentes das correntes de falta.

A análise de curto-circuito subsidiou diretamente a especificação da capacidade de interrupção dos disjuntores de cada nível de tensão, assegurando que os dispositivos de manobra fossem adequados aos piores cenários de falta previstos para o sistema [15].

A verificação quantitativa do dimensionamento, aplicando os critérios apresentados na Seção 2.2 (Equações 1 a 4) aos parâmetros nominais do fornecimento (Tabela I), é apresentada a seguir. Considerando a corrente nominal de 1250 A, comum aos três grupos funcionais, e adotando uma densidade de corrente admissível de referência de 1,2 A/mm² para barramento de cobre em ambiente interno (Equação 1), a seção mínima exigida pelo critério de ampacidade resulta em aproximadamente 1042 mm² por fase.

Para as Tags 1 e 2 ($I_k'' = 31,5$ kA), aplicando o fator de pico $n = 2,6$ (Equação 2), a corrente de pico resultante é de aproximadamente 81,9 kA. A seção mínima exigida pelo critério térmico de curto-circuito (Equação 3, $t_k = 1$ s) é de aproximadamente 220 mm² por fase. Para a Tag 3 ($I_k'' = 40$ kA), a corrente de pico resultante é de aproximadamente 104,0 kA, e a seção mínima exigida pelo critério térmico é de aproximadamente 280 mm² por fase.

A comparação entre os critérios evidencia que, para os três grupos funcionais deste fornecimento, o critério de ampacidade em regime nominal (aproximadamente 1042 mm²) é mais restritivo do que o critério térmico de curto-circuito (220 a 280 mm²), de modo que a seção do barramento foi determinada predominantemente pela corrente nominal contínua, e não pela corrente de falta — resultado coerente com sistemas que operam com corrente nominal elevada (1250 A) frente a níveis de curto-

circuito moderados para a classe de tensão considerada. O barramento de cobre fornecido, estruturado em barras chatas montadas em paralelo conforme a prática construtiva usual para esse nível de corrente, teve sua adequação tanto ao regime nominal quanto ao regime de falta confirmada por meio dos ensaios de tipo exigidos pela IEC 62271-200 e da ausência de não conformidades registradas durante o FAT.

A verificação do esforço eletrodinâmico (Equação 4) depende do espaçamento físico entre fases, parâmetro constante do desenho de detalhe construtivo do barramento, não disponível para este trabalho. Por esse motivo, a verificação numérica desse esforço não é apresentada; sua conformidade foi, no entanto, atestada pelos ensaios de tipo de suportabilidade a curto-circuito exigidos pela norma IEC 62271-200, aos quais a linha de produto utilizada está submetida. As Figuras 1 e 2 ilustram, respectivamente, a disposição interna das conexões de barramento e os polos do disjuntor de uma das colunas fabricadas.

2) *Relé Digital de Proteção Multifuncional para Transformadores*: Os painéis de proteção de transformadores receberam relés digitais multifuncionais, cujas funções de proteção ativas foram configuradas conforme os requisitos do cliente e os estudos elétricos do sistema. O relé empregado, destinado especificamente à proteção de transformadores de médio e grande porte, dispõe das seguintes funções ANSI parametrizadas neste projeto [9]:

- **ANSI 50/51** — Proteção de sobrecorrente de fase (instantânea e temporizada), responsável pela detecção de faltas fase-fase e trifásicas;
- **ANSI 50N/51N** — Proteção de sobrecorrente de neutro (falta à terra), essencial para detecção de faltas monofásicas no sistema;
- **ANSI 87T** — Proteção diferencial de transformador, principal função de proteção de zona interna, atuando de forma seletiva para faltas internas ao transformador;
- **ANSI 49** — Proteção de sobrecarga térmica, assegurando a proteção do transformador contra sobreaquecimento em regime continuado;
- **ANSI 46** — Proteção de sequência negativa (desequilíbrio de corrente de fase), detectando condições de desequilíbrio que possam comprometer o equipamento;
- **ANSI 59/27** — Proteção de sobretensão e subtensão,



Fig. 1. Vista interna do compartimento de barramento de uma das colunas

Fonte: O autor.

garantindo a operação dentro dos limites admissíveis de tensão;

- **ANSI 50BF** — Proteção de falha de disjuntor, atuando como redundância de segurança em caso de falha do dispositivo de interrupção;
- **ANSI 68** — Detecção de corrente de inrush (segundo harmônico), prevenindo atuações indevidas da proteção diferencial durante a energização do transformador.

A função 87T merece destaque especial. A proteção diferencial é considerada a principal defesa contra faltas internas em transformadores de potência, pois compara as correntes nos enrolamentos primário e secundário e atua de forma instantânea ao detectar qualquer desequilíbrio incompatível com o regime normal de operação [16]. A correta parametrização da função 87T, em conjunto com a detecção de inrush (ANSI 68), foi uma das etapas mais críticas da engenharia de proteção, uma vez que a corrente de magnetização transitória na energização pode atingir valores elevados, capazes de provocar atuações indevidas caso os parâmetros de restrição não estejam adequadamente ajustados [9].

O relé dispõe ainda de função de detecção de arco elétrico (Arc Flash Detection), associada a sensores ópticos distribuídos nos compartimentos internos dos painéis, permitindo a atuação em tempos inferiores a 1 ms após a detecção do arco. Essa funcionalidade contribui diretamente para o atendimento



Fig. 2. Polos do disjuntor de média tensão de uma das colunas

Fonte: O autor.

à classificação de arco interno (IAC) exigida pela norma IEC 62271-200 [4].

3) *Comunicação e Digitalização*: Os relés foram integrados à rede de comunicação industrial por meio do protocolo IEC 61850 [3], permitindo a supervisão remota, o registro de eventos e o acesso aos relatórios de perturbação por meio de uma plataforma digital de gestão e monitoramento de ativos elétricos. A integração digital possibilita, além do monitoramento contínuo de parâmetros elétricos — como correntes de fase, tensões, fator de potência e energia ativa e reativa —, a implementação futura de estratégias de manutenção preditiva baseadas em dados históricos de operação [17]. As Figuras 3 e 4 registram etapas da montagem eletromecânica de uma das colunas, resultado direto do trabalho de engenharia e fabricação descrito nesta seção.

C. Resultados do Gerenciamento do Projeto

1) *Controle de Cronograma e Marcos Críticos*: O cronograma do projeto foi estruturado com base na metodologia do PMI [2], utilizando a técnica de análise de caminho crítico (CPM) para identificação das atividades com maior impacto sobre o prazo de entrega. Os principais marcos (*milestones*) controlados ao longo do projeto foram: aprovação dos diagramas elétricos pelo cliente, liberação dos materiais de longo prazo (*long lead items*), início e conclusão da montagem eletromecânica, e realização do FAT.

A gestão dos *long lead items* — em especial transformadores, disjuntores de média tensão e relés de proteção — foi tratada como atividade crítica desde o *kickoff* do projeto, dada a



Fig. 3. Montagem sem caixa BT

Fonte: O autor.

influência direta desses itens sobre o início da montagem [14]. O controle semanal de marcos, por meio de relatórios de progresso compartilhados com o cliente, assegurou a transparência e a rastreabilidade do avanço físico do projeto.

2) *Gestão de Suprimentos e Conformidade RETIE*: Um dos principais riscos identificados na fase de planejamento foi a necessidade de conformidade de materiais e componentes com o Regulamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE 2024), vigente na Colômbia [5]. No âmbito deste projeto, a exigência de certificação RETIE impactou diretamente a especificação e aquisição de cabos de potência e de controle. A estratégia adotada para mitigação deste risco consistiu na implementação de *gates* de materiais, pontos de controle formais nos quais os certificados de conformidade emitidos por organismos acreditados eram verificados antes da liberação dos itens para a linha de produção. Essa abordagem eliminou o risco de retrabalho ou rejeição de materiais em etapas avançadas do processo, preservando o cronograma de fabricação [2].

3) *Gestão de Riscos*: A matriz de riscos elaborada contemplou eventos de diferentes naturezas, incluindo atrasos logísticos em portos internacionais, inconsistências na documentação aduaneira para exportação à Colômbia, e eventuais não conformidades técnicas detectadas no FAT. Para cada risco mapeado, foram definidos planos de resposta específicos, classificados conforme as estratégias de mitigação,



Fig. 4. Montagem da caixa BT

Fonte: O autor.

transferência ou aceitação, conforme preconizado pelo Guia PMBOK [2].

O risco de indisponibilidade de cabos certificados RETIE foi classificado como de alta probabilidade e alto impacto, sendo tratado por meio da antecipação do processo de compra e da diversificação da base de fornecedores homologados. A materialização parcial deste risco — verificada na fase inicial de levantamento de fornecedores, quando um número restrito de fabricantes possuía a certificação exigida — validou a importância da identificação precoce e da resposta proativa adotada [5].

D. Conformidade Normativa: Paralelo entre Normas Internacionais, Nacionais e Colombianas

A condução de um projeto de exportação sob múltiplas referências normativas exigiu o estudo sistemático das normas técnicas nacionais brasileiras correspondentes a cada disciplina abordada, de modo a estabelecer um paralelo consistente com as normas internacionais adotadas pelo fabricante e com a regulamentação colombiana aplicável. A Tabela II sintetiza esse paralelo para os principais temas técnicos do projeto.

O estudo comparativo evidencia que, no nível dos equipamentos — conjuntos de manobra, transformadores e relés de proteção —, a norma brasileira não constitui uma referência divergente, mas sim uma adoção direta da correspondente norma IEC, por meio do mecanismo de harmonização normativa adotado pela ABNT. Em consequência, os níveis de curto-

TABELA II

Paralelo entre normas internacionais, brasileiras e colombianas aplicáveis ao projeto

Aspecto técnico	Norma internacional (IEC)	Norma brasileira (ABNT)	Regulamentação colombiana
Conjuntos de manobra de MT	IEC 62271-200 [4]	ABNT NBR IEC 62271-200 (adoção direta) [4]	RETIE referencia diretamente a IEC 62271-200 [5]
Transformadores de potência	IEC 60076 [11]	ABNT NBR IEC 60076 (adoção direta) [11]	RETIE/NTC referenciam a mesma base IEC [13]
Relés de proteção	IEC 60255 [9]	ABNT NBR IEC 60255 (adoção direta) [9]	RETIE/NTC referenciam a mesma base IEC [13]
Instalações de média tensão (1 a 36,2 kV)	—	ABNT NBR 14039, norma nacional própria [10]	RETIE, regulamento técnico nacional de cumprimento obrigatório [5]
Instalações elétricas gerais / fiação	IEC 60364 (referência internacional)	ABNT NBR 5410, alinhada à filosofia IEC [18]	NTC 2050, adaptação do <i>National Electrical Code</i> (NFPA 70, EUA) [12]
Certificação de componentes	Não exigida pela norma de produto em si	Sistema brasileiro de avaliação de conformidade (INMETRO)	Certificação obrigatória por organismo acreditado [5]

Elaborado pelo autor, com base no levantamento normativo realizado na Fase 1 (Seção 2.6).

circuito empregados no fornecimento (31,5 kA e 40 kA) correspondem a valores preferenciais já padronizados na série IEC 62271, igualmente válidos sob a ótica da norma brasileira equivalente, sem necessidade de adequação adicional para esse critério.

A divergência mais relevante identificada não se situa, portanto, no projeto eletromecânico do equipamento em si, mas na natureza do instrumento regulatório colombiano. Enquanto as normas ABNT, em sua maioria, configuram-se como referências técnicas voluntárias, o RETIE é um regulamento técnico de cumprimento obrigatório por força de lei, que impõe a certificação de determinados componentes por organismo acreditado — exigência sem equivalente direto e tão restritivo no fluxo usual de fornecimento ao mercado brasileiro. Adicionalmente, observou-se que, embora os conjuntos de manobra e demais equipamentos de média tensão sigam a mesma base normativa IEC adotada no Brasil, as instalações elétricas gerais na Colômbia (NTC 2050) seguem uma filosofia distinta, derivada do *National Electrical Code* norte-americano, o que contrasta com a base IEC adotada pela ABNT NBR 5410 no Brasil — um ponto de atenção relevante para a interface entre os painéis fornecidos e a instalação elétrica geral da planta do cliente.

Em razão dessa convergência normativa no nível do equipamento, as principais modificações motivadas pelas exigências internacionais e colombianas concentraram-se na esfera documental e de certificação da cadeia de suprimentos — já detalhada na Seção 4.3.2 —, e não em alterações no dimensionamento físico dos barramentos ou na seleção dos

dispositivos de proteção, cujos critérios técnicos (Seção 4.2.1) e funções ANSI parametrizadas (Seção 4.2.2) já atendiam, sem modificação, tanto à norma IEC de origem quanto às referências equivalentes brasileiras e colombianas.

E. Resultados dos Ensaios e do FAT

1) *Ensaios de Rotina*: Todos os 14 painéis foram submetidos a um plano de ensaios de rotina individuais, executados conforme os requisitos da norma IEC 62271-200 [4]. Os ensaios realizados em cada coluna incluíram:

- **Medição de resistência de contato dos circuitos principais**, por meio de micro-ohmímetro, verificando a integridade das conexões de barramento e a ausência de pontos de aquecimento localizados;
- **Ensaio de tensão aplicada à frequência industrial**, para verificação da integridade dielétrica do isolamento sólido e das distâncias de escoamento no ar, aplicando-se tensões conforme os níveis especificados pela norma para cada faixa de tensão nominal;
- **Ensaio de tensão induzida** (para colunas com transformadores de medição incorporados), verificando o isolamento entre enrolamentos;
- **Testes de continuidade e isolamento de circuitos de controle e auxiliares**, assegurando a integridade de toda a fiação secundária e dos circuitos de comando;
- **Verificação funcional dos mecanismos de operação mecânica**, incluindo o teste de todos os intertravamentos entre disjuntores, chaves terra e portas de acesso,

garantindo que as seqüências de operação segura fossem plenamente respeitadas.

Os resultados de todos os ensaios de rotina foram registrados em protocolos individuais por coluna, compondo a documentação de rastreabilidade de qualidade do fornecimento.

Cada grupo funcional foi adicionalmente submetido a um certificado de inspeção final, contemplando ensaios dielétricos, verificações visuais, ensaio funcional e ensaio de aderência e espessura de pintura, conduzidos com instrumentos de medição calibrados, entre os quais um multímetro digital e um megômetro (medidor de resistência de isolamento). O ensaio de tensão suportável à frequência industrial foi realizado com tensão aplicada de 50 kV para o circuito principal e 2,0 kV para o circuito auxiliar — valores compatíveis com a classe de isolamento de 17,5 kV adotada para a plataforma construtiva dos painéis, a qual confere margem dielétrica adicional em relação às tensões nominais de operação de 13,2 kV e 4,16 kV —, com resultado aprovado em todos os grupos, sem ruptura dielétrica registrada. Os certificados confirmam ainda a corrente nominal de 1250 A já considerada na verificação de dimensionamento apresentada na Seção 4.2.1.

A Tabela III apresenta os resultados do ensaio de resistência de isolamento, medido por megômetro em corrente contínua (5000 Vdc para o circuito principal e 1000 Vdc para o circuito auxiliar), para cada grupo funcional.

Os valores de resistência de isolamento obtidos situam-se substancialmente acima dos limites mínimos usualmente adotados como critério de aceitação para esse tipo de ensaio em circuitos de média tensão, da ordem de poucos megaohms, evidenciando a integridade do isolamento dos circuitos principal e auxiliar em todos os grupos fornecidos. Adicionalmente, todos os itens de verificação visual (componentes elétricos, dimensional, intertravamentos mecânicos, etiquetas e identificações), o ensaio funcional de conformidade com os diagramas elétricos e o ensaio de aderência e espessura de pintura (camada superior a 170 μm) foram aprovados sem ressalvas em todos os grupos, sob condições ambientais de ensaio de aproximadamente 29 °C e 67 % de umidade relativa. As Figuras 5 e 6 registram, respectivamente, a medição de resistência de isolamento com o megômetro (indicando 828 G Ω , valor correspondente ao registrado para a Tag 1 na Tabela III) e o equipamento utilizado no ensaio de tensão suportável à frequência industrial.

A fim de avaliar qualitativamente os resultados obtidos frente aos valores esperados para cada um dos ensaios de rotina previstos, a Tabela IV sistematiza essa comparação. Os ensaios de resistência de contato e de tensão induzida não constam na documentação de ensaios disponibilizada para a elaboração deste trabalho, sendo essa lacuna assumida explicitamente como limitação da análise (ver "Limitações do Trabalho", na Conclusão).



Fig. 5. Medição de resistência de isolamento com megômetro

Fonte: O autor.



Fig. 6. Equipamento utilizado no ensaio de tensão suportável à frequência industrial

Fonte: O autor.

2) *Teste de Aceitação em Fábrica (FAT):* O Factory Acceptance Test foi realizado ao longo de 5 dias úteis, com a presença de representantes técnicos do cliente colombiano, e compreendeu a validação funcional integrada dos 14 painéis interligados. O plano de testes do FAT foi estruturado para cobrir os seguintes aspectos:

- **Verificação dimensional e construtiva**, com inspeção visual e dimensional de todos os painéis, confirmando a conformidade com os desenhos de fabricação aprovados e com os requisitos de classificação IAC;
- **Testes funcionais de disjuntores e seccionadoras**, incluindo operações de abertura e fechamento local e remoto, verificação dos tempos de operação e funcionamento dos sistemas de sinalização;
- **Verificação da lógica de controle e intertravamentos**, simulando seqüências operacionais completas, inclusive lógicas de transferência de carga entre alimentadores, conforme especificação do cliente;

TABELA III

Resultados do ensaio de tensão suportável e de resistência de isolamento, por grupo funcional

Tag	Colunas	Ud principal (kV)	Ud auxiliar (kV)	Riso L1 (GΩ)	Riso L2 (GΩ)	Riso L3 (GΩ)	Riso auxiliar (MΩ)	Temp./UR ambiente
Tag 1	01 a 03	50	2,0	924	379	828	40,9	29,4 °C / 67 %
Tag 2	01 a 09	50	2,0	281	305	373	18,8	29,4 °C / 67 %
Tag 3	01 a 02	50	2,0	480	267	247	14,2	29,4 °C / 67 %

Elaborado pelo autor, com base nos certificados de inspeção final emitidos para cada grupo funcional.

- **Testes de injeção secundária nos relés de proteção**, realizados com equipamentos de injeção de corrente e tensão calibrados, verificando os tempos de atuação das funções 50/51, 50N/51N, 87T e 49, confrontando os resultados obtidos com as curvas de seletividade coordenadas na fase de engenharia [9];
- **Validação da integração digital**, confirmando a correta transmissão de dados de medição, eventos e alarmes via protocolo IEC 61850 [3] para a plataforma digital de gestão de ativos, bem como a funcionalidade do acesso via interface web embarcada nos relés.

A descrição a seguir refere-se à metodologia e aos critérios de verificação aplicáveis aos testes de injeção secundária realizados durante o FAT, ilustrados com base nos parâmetros nominais do fornecimento, e não aos valores numéricos efetivamente medidos durante o ensaio (ver discussão na "Limitações do Trabalho", na Conclusão).

A verificação das funções de sobrecorrente (ANSI 50/51 e 50N/51N) durante os testes de injeção secundária seguiu a metodologia usual de comparação entre o tempo de atuação medido e o tempo teórico calculado pela curva de tempo inversamente proporcional parametrizada no relé, conforme a formulação padronizada pela IEC 60255 [9]:

$$t = TMS \cdot \frac{k}{\left(\frac{I}{I_{pickup}}\right)^{\alpha} - 1} \quad (5)$$

onde t é o tempo de atuação, TMS é o multiplicador de tempo ajustado, I é a corrente de falta aplicada, I_{pickup} é a corrente de partida parametrizada, e k e α são constantes que definem a característica da curva — para a característica IEC *Very Inverse*, comumente empregada nesse tipo de proteção, $k = 13,5$ e $\alpha = 1$ [9]. O critério de aceitação usual para esse ensaio considera conforme o resultado cujo erro percentual entre o tempo medido e o tempo calculado pela Equação 5 permaneça dentro da tolerância de exatidão da norma, da ordem de $\pm 10\%$ [9].

Para ilustrar a ordem de grandeza da verificação realizada, considerando a corrente nominal de 1250 A do fornecimento e um ajuste de partida usual de mercado para a função 51 (entre 1,2 e 1,5 vezes a corrente nominal), os níveis de curto-circuito do fornecimento (31,5 kA e 40 kA) correspondem a múltiplos

de partida superiores a 15 vezes. Nessa faixa, a atuação é dominada pela função instantânea (ANSI 50), de tempo definido e independente da magnitude da corrente, e não pela porção inversa da curva da função 51 — o que é coerente com a estratégia de proteção combinada (50+51) adotada para faltas de elevada magnitude, como as previstas para este sistema.

A verificação da função diferencial (ANSI 87T) seguiu metodologia distinta, baseada na confirmação da característica percentual de operação do relé (*slope*), tipicamente composta por uma zona de restrição com sensibilidade de partida da ordem de 20 a 30 % da corrente nominal do transformador [16], e na verificação da função de restrição por segundo harmônico (ANSI 68), responsável por bloquear a atuação diante de níveis de conteúdo harmônico de segunda ordem superiores ao limiar parametrizado, tipicamente entre 15 e 20 % da componente fundamental [9]. O ensaio de injeção secundária simulou condições de falta interna (corrente diferencial acima da característica de operação) e de energização do transformador (corrente de magnetização com elevado conteúdo harmônico), confirmando a atuação correta do relé no primeiro cenário e o bloqueio adequado no segundo.

Ao término do período de cinco dias, todos os testes previstos no plano de FAT foram concluídos sem a identificação de não conformidades. O cliente emitiu o certificado de aprovação do FAT, autorizando o despacho dos equipamentos para exportação à Colômbia. Esse resultado evidencia a eficácia do processo de engenharia e fabricação adotado, bem como a robustez do plano de qualidade implementado ao longo do projeto. A Figura 7 registra um dos painéis durante a execução do ensaio de tensão suportável, com o equipamento de teste conectado, e a Figura 8 apresenta o conjunto de painéis já interligado durante o FAT.

F. Discussão dos Resultados

A análise integrada dos resultados obtidos permite identificar três contribuições principais do projeto para o tema proposto neste trabalho.

A primeira diz respeito à interdependência entre conformidade normativa e gestão de suprimentos. A exigência do RETIE 2024, ao restringir o universo de fornecedores homologados para determinados componentes, transformou uma decisão técnica de especificação em um condicionante direto do cronograma e do custo do projeto. A antecipação desse risco, viabilizada pela aplicação sistemática das práticas

TABELA IV

Avaliação qualitativa dos ensaios de rotina: valores esperados versus obtidos

Ensaio de rotina	Critério/valor esperado	Resultado obtido	Avaliação
Resistência de contato (micro-ohmímetro)	Não disponível para análise neste trabalho	Não disponível para análise neste trabalho	—
Tensão suportável à frequência industrial	Suportar 50 kV (circuito principal) e 2,0 kV (circuito auxiliar) sem ruptura dielétrica, conforme a classe de isolamento de 17,5 kV [4]	Aprovado nos três grupos funcionais, sem ruptura dielétrica registrada	Conformidade plena
Tensão induzida	Não disponível para análise neste trabalho (ensaio aplicável apenas às colunas com transformador de medição incorporado)	Não disponível para análise neste trabalho	—
Continuidade e isolamento de circuitos de controle e auxiliares	Continuidade nos circuitos de comando e resistência de isolamento adequada; sem valor mínimo normativo explícito, adotando-se como referência a prática usual de poucos MΩ	Funcionamento conforme diagrama elétrico aprovado; resistência de isolamento do circuito auxiliar entre 14,2 e 40,9 MΩ	Conformidade plena, com margem ampla
Verificação funcional dos mecanismos de operação mecânica e intertravamentos	Sequência operacional correta, sem interferência mecânica entre disjuntor, seccionadora de aterramento e porta de acesso	Aprovado nos três grupos funcionais	Conformidade plena

Elaborado pelo autor, com base nos certificados de inspeção final disponíveis para este trabalho.



Fig. 7. Painel sendo submetido ao ensaio de tensão suportável na baía de testes

Fonte: O autor.

de gerenciamento de riscos do PMI [2], foi determinante para a entrega dentro do prazo.

A segunda contribuição refere-se à relevância da função 87T como elemento central da estratégia de proteção do transformador. A parametrização adequada desta função, associada ao correto ajuste da detecção de inrush (ANSI 68), demonstrou ser uma etapa que exige profundo domínio técnico,

pois margens inadequadas podem resultar tanto em falta de sensibilidade — comprometendo a proteção — quanto em atuações indevidas durante a energização [16].

Por fim, destaca-se o papel da digitalização como habilitador de valor para o cliente final. A integração dos relés à plataforma de monitoramento via IEC 61850 transforma o conjunto de painéis em uma fonte contínua de dados operacionais, abrindo caminho para estratégias de manutenção baseada em condição e para a gestão eficiente do ciclo de vida dos equipamentos [17].

V. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo analisar e documentar o processo de desenvolvimento, gerenciamento e fabricação de um conjunto de 14 colunas de painéis de média tensão destinados ao setor sucroenergético colombiano, com ênfase na integração entre soluções eletrotécnicas e práticas estruturadas de gerenciamento de projetos. Os resultados obtidos permitem afirmar que o objetivo geral foi plenamente alcançado, tendo o projeto culminado na aprovação integral dos equipamentos no Teste de Aceitação em Fábrica (FAT), sem pendências técnicas registradas, e no despacho dos painéis para exportação dentro das condições contratuais estabelecidas.

Ao longo da execução, verificou-se que a integração entre engenharia elétrica e gerenciamento de projetos não constituiu



Fig. 8. Painéis interligados durante o FAT

Fonte: O autor.

apenas uma escolha metodológica, mas uma necessidade operacional concreta. A competência técnica da equipe de engenharia — expressa na qualidade dos diagramas elétricos, na parametrização dos sistemas de proteção e na solução de questionamentos técnicos apresentados pelo cliente — foi determinante para a construção de credibilidade junto ao cliente colombiano já nas fases iniciais do projeto. Os debates técnicos conduzidos durante a fase de engenharia e a aprovação dos documentos sem ressalvas substanciais evidenciam que o rigor eletrotécnico aplicado correspondeu às expectativas de um cliente de elevado nível de exigência [1].

Do ponto de vista gerencial, o projeto apresentou um desafio de dupla natureza. O primeiro, e mais significativo, foi a necessidade de conduzir um fornecimento sob os requisitos do Regulamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) em sua versão de 2024 — norma nova à época da execução do projeto e aplicada pela primeira vez neste fornecimento [5]. A ausência de precedentes internos e o universo restrito de fornecedores com materiais homologados conforme os novos critérios exigiram um esforço adicional de levantamento normativo, qualificação de fornecedores e gestão proativa de riscos. Esse cenário validou, na prática, a importância da identificação precoce de riscos regulatórios e da implementação de planos de resposta estruturados, conforme preconizado pelo Guia PMBOK [2].

O segundo desafio gerencial materializou-se durante a fase de montagem, quando a ausência de determinados materiais — identificada somente na linha de produção — ocasionou

um atraso na entrega dos equipamentos ao cliente. Embora o impacto tenha sido controlado e não tenha comprometido o resultado final do projeto, o episódio evidencia uma oportunidade de melhoria nos processos de planejamento de materiais: a antecipação das verificações de disponibilidade de insumos para etapas anteriores ao início da montagem, por meio de inspeções de pré-montagem (*pre-assembly checks*), poderia ter eliminado ou minimizado o atraso identificado [14]. Essa lição constitui, por si só, uma contribuição prática deste estudo de caso para projetos futuros de natureza similar.

No plano do desenvolvimento profissional, este projeto evidenciou dimensões da prática de engenharia que dificilmente seriam acessíveis no ambiente acadêmico convencional. A gestão simultânea de prazos, escopo e qualidade em um contexto de exportação; a condução de debates técnicos com equipes multidisciplinares e com representantes do cliente; o acompanhamento direto das fases de montagem e validação; e o desenvolvimento das competências interpessoais exigidas pelo relacionamento com um cliente internacional configuram um conjunto de aprendizados que transcende o domínio técnico e integra a formação do engenheiro em sua dimensão mais ampla [6].

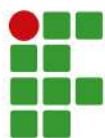
Limitações do Trabalho

O presente estudo apresenta limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A primeira delas refere-se ao escopo do fornecimento analisado: os estudos de coordenação e seletividade da proteção, que definem os parâmetros de ajuste dos relés em relação ao sistema elétrico global da planta, foram de responsabilidade do cliente e, portanto, não integram o escopo deste trabalho. A análise da parametrização dos relés limita-se, assim, à verificação funcional realizada no FAT, sem abranger a avaliação do desempenho do sistema de proteção em sua totalidade [8].

A segunda limitação decorre da impossibilidade de acompanhamento das atividades de campo. O Site Acceptance Test (SAT) e o comissionamento dos equipamentos nas instalações do cliente, etapas nas quais o desempenho real do sistema em condições operacionais poderia ser avaliado, ocorreram fora do período e do escopo deste trabalho. Dessa forma, os resultados apresentados refletem o desempenho dos equipamentos em ambiente controlado de fábrica, sem a contrapartida de validação em campo.

A terceira limitação refere-se à disponibilidade parcial da documentação quantitativa dos ensaios de rotina. Dos cinco ensaios previstos no plano de qualidade do fornecimento, a documentação disponibilizada para este trabalho permitiu a análise quantitativa do ensaio de tensão suportável à frequência industrial, da resistência de isolamento e da verificação funcional dos intertravamentos; os resultados de resistência de contato dos circuitos principais e do ensaio de tensão induzida não constavam nessa documentação e, portanto, não puderam ser incorporados à avaliação apresentada na Seção 4.5.1.

A quarta limitação refere-se aos testes de injeção secundária



realizados nos relés de proteção durante o FAT. Por terem sido executados por uma empresa terceirizada contratada especificamente para essa atividade, os resultados numéricos detalhados (tempos de atuação efetivamente medidos) não estavam disponíveis para incorporação a este trabalho. A análise apresentada na Seção 4.5.2 limita-se, portanto, à descrição da metodologia e dos critérios normativos de verificação aplicáveis, ilustrados com base nos parâmetros nominais do fornecimento, e não aos valores efetivamente medidos durante o ensaio.

Trabalhos Futuros

Com base nas limitações identificadas e nas oportunidades de aprofundamento observadas ao longo do estudo, propõem-se as seguintes direções para trabalhos futuros:

- Análise do Site Acceptance Test (SAT) e do comissionamento dos painéis nas instalações do cliente colombiano, avaliando o desempenho real dos sistemas de proteção, controle e digitalização em condições operacionais de planta industrial;
- Desenvolvimento de um estudo completo de coordenação e seletividade da proteção do sistema elétrico da planta sucroenergética, integrando os painéis fornecidos ao contexto do sistema de distribuição global do cliente, com análise das curvas tempo-corrente e verificação da hierarquia de atuação dos dispositivos de proteção [8];
- Avaliação do impacto econômico e logístico da certificação RETIE na cadeia de suprimentos de fabricantes brasileiros de equipamentos elétricos, investigando os custos de homologação, a disponibilidade de fornecedores habilitados e as estratégias de mitigação de risco adotadas pelo setor [5];
- Investigação do desempenho das soluções de digitalização e monitoramento remoto implementadas nos painéis ao longo do primeiro ciclo operacional da planta, avaliando a contribuição da plataforma de gestão de ativos para a manutenção preditiva e a eficiência energética da instalação [17].

REFERÊNCIAS

- [1] J. Mamede Filho, *Instalações Elétricas Industriais*, 8 ed., LTC, Rio de Janeiro, 2010.
- [2] Project Management Institute, *A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK Guide)*, 7 ed., Project Management Institute, Newtown Square, PA, 2021.
- [3] International Electrotechnical Commission, “IEC 61850: Communication networks and systems for power utility automation”, International Standard. Geneva, Switzerland, 2013.
- [4] International Electrotechnical Commission, “IEC 62271-200: High-voltage switchgear and controlgear – Part 200: AC metal-enclosed switchgear and controlgear for rated voltages above 1 kV and up to and including 52 kV”, International Standard. Geneva, Switzerland, 2021.
- [5] Ministerio de Minas y Energía de Colombia, “Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE”, Reglamento Técnico. Bogotá, Colombia, 2024.
- [6] R. K. Yin, *Estudo de Caso: Planejamento e Métodos*, 5 ed., Bookman, Porto Alegre, 2015.
- [7] International Electrotechnical Commission, “IEC 60865-1:2011 Short-circuit currents – Calculation of effects – Part 1: Definitions and calculation methods”, , 2011.
- [8] G. Kindermann, *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*, Edição do Autor, Florianópolis, 2005.
- [9] International Electrotechnical Commission, “IEC 60255-151: Measuring relays and protection equipment – Part 151: Functional requirements for over/under-current protection”, International Standard. Geneva, Switzerland, 2009.
- [10] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “ABNT NBR 14039: Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kV a 36,2 kV”, Norma Brasileira. Rio de Janeiro, 2005.
- [11] International Electrotechnical Commission, “IEC 60076-1: Power transformers – Part 1: General”, International Standard. Geneva, Switzerland, 2011.
- [12] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC, “NTC 2050: Código Eléctrico Colombiano”, Norma Técnica Colombiana. Bogotá, Colombia, 1998.
- [13] Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación – ICONTEC, “NTC 5720: Aparamento de Alta Tensión. Conjuntos de maniobra y control de media tensión para tensiones asignadas superiores a 1 kV e inferiores o iguales a 52 kV”, Norma Técnica Colombiana. Bogotá, Colombia, 2009.
- [14] H. Kerzner, *Project Management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling*, 12 ed., John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2017.
- [15] W. D. Stevenson, J. J. Grainger, *Power Systems Analysis*, 4 ed., McGraw-Hill, New York, 1994.
- [16] J. L. Blackburn, T. J. Domin, *Protective Relaying: Principles and Applications*, 3 ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 2006.
- [17] H. Boyes, B. Hallaq, J. Cunningham, T. Watson, “The Industrial Internet of Things (IIoT): An Analysis Framework”, *Computers in Industry*, vol. 101, pp. 1–12, 2018, doi:10.1016/j.compind.2018.04.015.
- [18] Associação Brasileira de Normas Técnicas, “NBR 5410:2004 Instalações elétricas de baixa tensão”, , 2004.