

INSTITUTO FEDERAL

Paraíba

Campus João Pessoa

CURSO SUPERIOR DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

TIAGO COSTA MEDEIROS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**READEQUAÇÃO DA PROTEÇÃO DE UM SISTEMA ELÉTRICO DE
69 kV/ 7500 kVA - ESTUDO DE CASO**

João Pessoa
2025

TIAGO COSTA MEDEIROS

READEQUAÇÃO DA PROTEÇÃO DE UM SISTEMA ELÉTRICO DE 69 kV / 7500 kVA -
ESTUDO DE CASO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso Superior de Bacharelado
em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Orientador:

Franklin Martins Pereira Pamplona, Dr.

João Pessoa
2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação – CIP
Biblioteca Nilo Peçanha – IFPB, *Campus* João Pessoa

M488r Medeiros, Tiago Costa.

Readequação da proteção de um sistema elétrico de 69 kV/
7500 kVA – estudo de caso / Tiago Costa Medeiros. – 2025.
32 f. : il.

TCC (Curso Superior de Bacharelado em Engenharia
Elétrica) – Instituto Federal de Educação da Paraíba / Unidade
Acadêmica de Controle e Processos Industriais / Coordenação
do Curso Superior de Bacharelado em Engenharia Elétrica,
2025.

Orientador: Prof. Dr. Franklin Martins Pereira Pamplona.

1. Sistema elétrico de potência. 2. Coordenação de proteção. 3. Subestação de alta tensão. 4. Infraestrutura de saneamento. I. Título.

CDU 621.3.016.2(043)

TIAGO COSTA MEDEIROS

READEQUAÇÃO DA PROTEÇÃO DE UM SISTEMA ELÉTRICO DE 69 kV / 7500 KVA -
ESTUDO DE CASO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso Superior de Bacharelado
em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Trabalho Aprovado em 01 / 09 / 2025 pela banca examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **FRANKLIN MARTINS PEREIRA PAMPLONA**
Data: 03/02/2026 18:13:38-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Franklin Martins Pereira Pamplona, Dr.
Orientador, IFPB

Documento assinado digitalmente
 **ALVARO DE MEDEIROS MACIEL**
Data: 03/02/2026 20:33:25-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Álvaro de Medeiros Maciel, Dr.
Examinador, IFPB

Documento assinado digitalmente
 **GILVAN VIEIRA DE ANDRADE JUNIOR**
Data: 05/02/2026 08:32:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gilvan Vieira de Andrade Junior, Dr.
Examinador, IFPB

*Dedico este trabalho a Deus, por ser
minha luz e força; à minha família, por todo
amor, apoio e incentivo; e aos professores Dr.
Franklin Martins Pamplona e Alfredo Gomes
Neto, pela orientação, confiança e inspiração
ao longo desta jornada na Engenharia Elétrica.*

RESUMO

A confiabilidade dos sistemas elétricos de potência é essencial para garantir o fornecimento contínuo e seguro de energia, especialmente em instalações de serviços públicos essenciais, como os sistemas de captação e distribuição de água. A ocorrência de falhas nesses sistemas pode causar sérios impactos operacionais, sanitários e sociais. A proteção adequada dos componentes elétricos é, portanto, um fator estratégico para a integridade dos ativos e para a segurança da operação. Este trabalho apresenta uma análise técnica do sistema de proteção da subestação de 69 kV da unidade de captação Gramame, localizada na região metropolitana de João Pessoa, responsável pelo abastecimento de água de aproximadamente 700 mil pessoas. A substituição de transformadores de corrente e potencial da subestação em análise tornou necessária a readequação dos ajustes de proteção, exigindo o recálculo dos parâmetros de operação e a verificação da coordenação com os dispositivos da concessionária Energisa. A metodologia adotada compreendeu o levantamento dos dados da instalação, o cálculo das correntes de operação e de curto-circuito, o ajuste dos relés de proteção com base em normas técnicas e a validação das curvas de atuação. O estudo reforça a importância da seletividade e da confiabilidade na proteção de sistemas elétricos vinculados a estruturas críticas de infraestrutura. Conclui-se que uma proteção bem dimensionada não apenas preserva os equipamentos, mas também assegura a continuidade dos serviços e contribui diretamente para a qualidade de vida da população atendida.

Palavras-chave: Sistemas elétricos, Coordenação de proteção, Subestação de Alta tensão, Infraestrutura de Saneamento.

ABSTRACT

The reliability of electrical power systems is essential to ensure a continuous and safe supply of energy, especially in essential public service facilities such as water collection and distribution systems. Failures in these systems can cause serious operational, health, and social impacts. Proper protection of electrical components is therefore a strategic factor for asset integrity and operational safety. This paper presents a technical analysis of the protection system of the 69 kV substation of the Gramame collection unit, located in the metropolitan region of João Pessoa, responsible for supplying water to approximately 700,000 people. The replacement of current and potential transformers in the substation under analysis necessitated readjustment of the protection settings, requiring the recalculation of operating parameters and verification of coordination with the devices of the utility company Energisa. The methodology adopted included the collection of installation data, the calculation of operating and short-circuit currents, the adjustment of protection relays based on technical standards, and the validation of actuation curves. The study reinforces the importance of selectivity and reliability in protecting electrical systems connected to critical infrastructure structures. It concludes that well-designed protection not only preserves equipment but also ensures service continuity and directly contributes to the quality of life of the population served.

Keywords: Power systems, Protection coordination, High-voltage substation, Sanitation infrastructure.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Vista Geral do ramal de alimentação da subestação Gramame.	15
Figura 2. Exemplo de Coordenograma.....	19
Figura 3. Características de partida e térmicas do motor de indução.	22
Figura 4. Diagrama de Comando e Proteção da Subestação Gramame.	24
Figura 5. Coordenograma de proteção da SE	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Resumo de parâmetros ANSI calculados.	27
Tabela 2. Parâmetros dos elementos de proteção de alta tensão.	28
Tabela 3. Correntes de Curto-circuito no ponto de Conexão com a Concessionária	29
Tabela 4. Quadro-Resumo dos parâmetros de ajuste do Relé	30

SUMÁRIO

1.	Introdução	14
1.1.	Objetivos.....	15
1.2.	Organização do Trabalho.....	16
2	Fundamentação teórica.....	17
2.1	Filosofia de proteção.....	17
2.2	Proteção de Transformadores	20
2.3	Proteção de Motores	20
3	Métodos e resultados.....	22
3.1	Cálculo da corrente nominal	24
4	Resultados	30
5	Considerações Finais.....	32
6	Referências Bibliográficas.....	34
	Apêndice A – diagrama unifilar de Comando e Proteção da subestação gramame	35

1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) são compostos por um conjunto de equipamentos, dispositivos e estruturas responsáveis pela geração, transmissão, distribuição e utilização da energia elétrica. Para garantir sua operação segura, eficiente e contínua, é essencial que esses sistemas estejam devidamente protegidos contra condições anormais de funcionamento, como curtos-circuitos, sobrecorrentes, falhas de isolamento e surtos de tensão.

Segundo Mamede (2017), “a proteção de sistemas elétricos deve ser compreendida como um elemento estratégico para a segurança operacional e a preservação de ativos críticos do setor elétrico”. A proteção adequada evita danos materiais, riscos à integridade física e assegura a confiabilidade dos serviços dependentes da energia elétrica.

Em instalações que abastecem sistemas públicos essenciais, como os de captação, tratamento e distribuição de água, a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica torna-se ainda mais crítica. A interrupção prolongada da energia pode comprometer não apenas a operação dos equipamentos eletromecânicos envolvidos no processo, como também a continuidade do abastecimento à população, gerando impactos sanitários e sociais significativos.

Diante desse cenário, este trabalho visa apresentar uma análise técnica do sistema de proteção de uma Subestação Elétrica (SE) de 69 kV, com foco na readequação dos ajustes de proteção após a substituição dos transformadores de corrente e potencial. O estudo concentra-se na subestação da unidade de captação Gramame, ilustrada na Figura 1, que é responsável pelo abastecimento de água de parte significativa da população da Grande João Pessoa, reforçando a importância da confiabilidade elétrica para a continuidade dos serviços públicos essenciais.

Figura 1. Vista Geral do ramal de alimentação da subestação Gramame.



Fonte: Autoria própria.

1.1. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é analisar e definir os parâmetros de proteção adequados à subestação de 69 kV da unidade de captação Gramame, considerando os novos componentes instalados e os requisitos técnicos da concessionária Energisa.

Como objetivos específicos, destacam-se: calcular os valores de corrente de operação e de falta; ajustar os relés de proteção com base em critérios normativos e técnicos; validar as curvas de atuação em comparação aos limites dos equipamentos; e verificar a coordenação com os dispositivos de proteção da concessionária.

A relevância deste estudo reside no fato de que sistemas elétricos bem protegidos reduzem significativamente os riscos de desligamentos intempestivos e de falhas catastróficas. No contexto de instalações de saneamento essa segurança operacional, além

da grandeza econômica, também representa um fator determinante para a saúde pública e a qualidade de vida da população atendida.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho realiza uma introdução acerca da importância da proteção e seletividade em sistemas elétricos de potência a partir de fundamentos teóricos consolidados; abrange a filosofia de proteção, seus conceitos, elementos e por fim descreve a aplicabilidade das técnicas empregadas para Proteção de um Sistema Elétrico em tensão 69 kV e 7500 kVA de potência destinado a suprir a demanda energética de um sistema de saneamento básico que atende a uma população de aproximadamente 700 mil pessoas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo apresenta-se uma introdução sucinta de tópicos sobre proteção e seletividade em sistemas elétricos de potência, destacando os fundamentos teóricos consolidados. São descritos a filosofia de proteção, seus conceitos, elementos e por fim descreve a aplicabilidade das técnicas empregadas para proteção de sistemas elétricos de potência.

2.1 FILOSOFIA DE PROTEÇÃO

A filosofia de proteção representa o conjunto de requisitos que norteiam a definição, o projeto e a aplicação dos dispositivos e sistemas de proteção em uma instalação elétrica. Essa filosofia baseia-se em cinco aspectos fundamentais, os quais devem ser observados de forma integrada para garantir que as proteções atuem corretamente diante de distúrbios ou faltas no sistema: rapidez, seletividade, sensibilidade, confiabilidade, simplicidade.

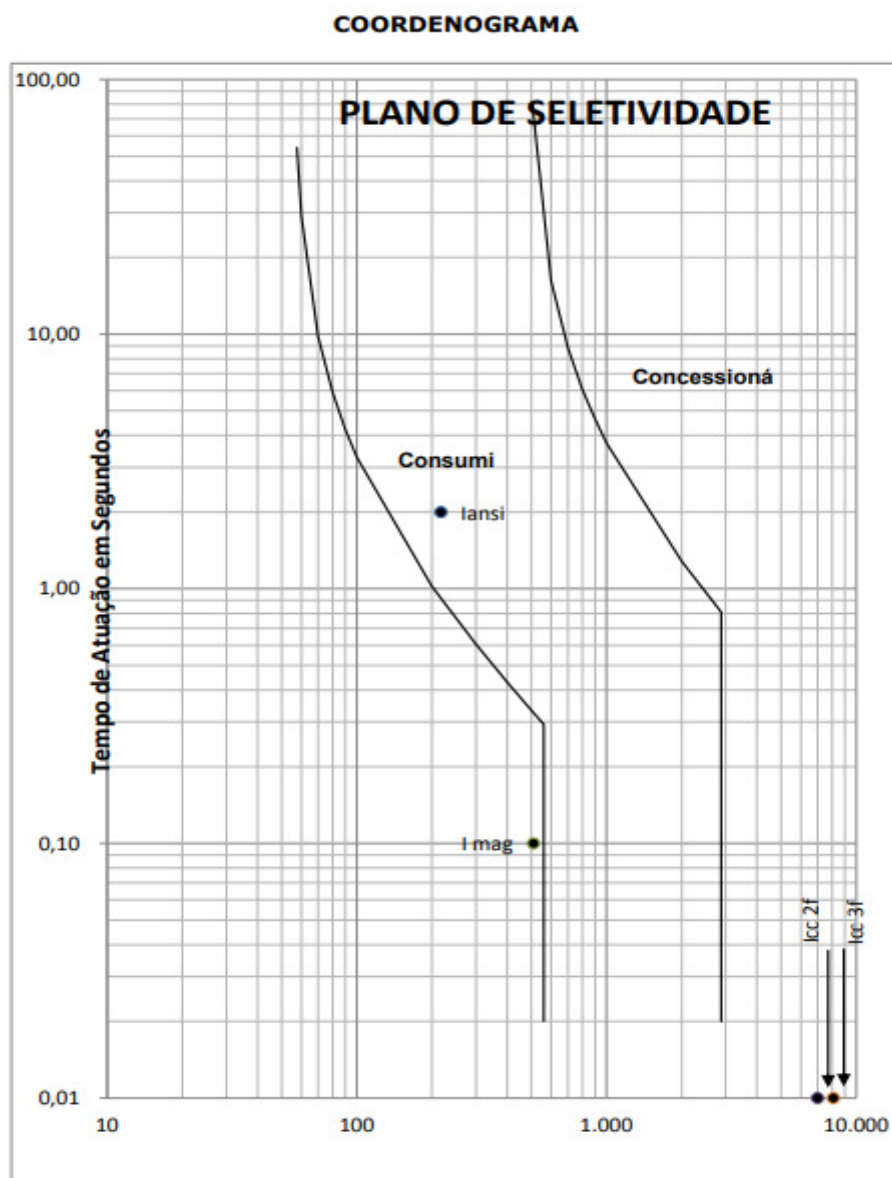
Cada um desses aspectos será conceituado a seguir:

Rapidez: A proteção deve atuar no menor tempo possível após a detecção de uma condição anormal, a fim de minimizar os danos aos equipamentos, reduzir os riscos à segurança das pessoas e evitar a propagação da falha para outras partes do sistema. Quanto mais rápida for a atuação, menor será a energia de falta envolvida. No caso específico deste projeto, a atuação deve ocorrer tão mais rápido quanto possa suportar o equipamento mais crítico do sistema, neste caso o transformador. Assim o tempo de atuação deve ser inferior ao tempo que o transformador pode suportar a máxima corrente a partir da sua potência nominal, de acordo com a norma ANSI;

Seletividade: Este é um dos princípios mais importantes da proteção. A seletividade garante que apenas o dispositivo mais próximo à falha atue, desligando o menor trecho possível da instalação. Isso permite manter o restante do sistema energizado, assegurando a continuidade parcial do serviço. No caso em referência, a seletividade deve ser adotada visando a proteção apenas da subestação, para isso deve atuar para um mesmo índice de corrente de falta, no mínimo, 300ms antes da proteção a montante da subestação. Para Mamede (2017), “a seletividade deve ser alcançada por meio da coordenação de ajustes entre os dispositivos de proteção dispostos em cascata, evitando desligamentos desnecessários”. A coordenação pode ser visualmente aferida por

meio do coordenograma, gráfico que representa as curvas de atuação da proteção do sistema Cliente e Concessionária (a montante) para as correntes do sistema em relação ao tempo de atuação do relé de proteção, como exemplificado na Figura 2.

Figura 2. Exemplo de Coordenograma



Fonte: Especificação técnica ET-03 Eletrobrás

Sensibilidade: Trata-se da capacidade do sistema de proteção em identificar, com precisão, correntes de falta mesmo que de baixa magnitude. Uma proteção sensível é capaz de detectar faltas de alta impedância, que podem não apresentar correntes elevadas, mas ainda assim representar riscos operacionais.

Confiabilidade: A proteção deve funcionar corretamente sempre que solicitada. Isso significa não apenas evitar falhas na atuação, mas também eliminar riscos de atuações indevidas em condições normais de operação.

Simplicidade: Quanto mais simples for o sistema de proteção, maior será sua confiabilidade e menor será a probabilidade de erros na parametrização, manutenção ou operação. A simplicidade está relacionada à facilidade de entendimento, análise e intervenção técnica. Para este caso, o sistema de proteção contra sobrecorrentes pode ser simplificado em 3 etapas: Medição, Controle e supervisão e Interrupção ou bloqueio, respectivamente desempenhadas pelos TC's, Relé e Disjuntor.

Além de compreender esses fundamentos, é indispensável ao profissional de proteção elétrica entender a natureza das faltas elétricas e suas classificações. As faltas representam situações anormais no sistema, tais como curtos-circuitos, falhas à terra, surtos ou desequilíbrios de corrente. Podem ser de origem interna (entre fases, fase-terra) ou externa (sobrecargas, perturbações de tensão).

Para o dimensionamento correto das proteções, é essencial conhecer os valores de corrente e tensão nas condições de falta, que variam conforme o tipo e a localização da anomalia. A partir desses valores, são definidos os ajustes das proteções temporizadas (funções 51 e 51N) e instantâneas (funções 50 e 50N), além da escolha dos Transformadores de Corrente (TCs), Transformadores de Potencial (TPs) e relés apropriados.

A análise das correntes de curto-circuito é, portanto, uma etapa crítica no desenvolvimento de qualquer estudo de proteção. Os ajustes dos relés devem considerar as correntes mínimas detectáveis (para garantir sensibilidade), as correntes de partida (para evitar disparos indevidos durante a energização) e as correntes máximas suportáveis pelos equipamentos (para garantir proteção térmica e mecânica).

Conforme orienta Kindermann (2009), “a definição da curva e dos ajustes de tempo e corrente deve respeitar os limites térmicos do equipamento, garantindo que a atuação da proteção ocorra antes do dano, mas depois de possíveis transitórios normais do sistema”.

A correta aplicação da filosofia de proteção é o que assegura que o sistema elétrico opere com alta disponibilidade, segurança operacional e resiliência frente a falhas inevitáveis.

2.2 PROTEÇÃO DE TRANSFORMADORES

A proteção de transformadores envolve a identificação e a correta interpretação de fenômenos característicos de sua operação, entre os quais se destaca a corrente de magnetização ou corrente de *Inrush* (I_{inrush}). Essa corrente ocorre no momento da energização do transformador, quando a tensão aplicada ao enrolamento primário estabelece o fluxo magnético no núcleo. Por se tratar de um material ferromagnético, o núcleo apresenta uma curva de magnetização não linear e, ao atingir a região de saturação magnética, provoca picos de corrente elevados e de curta duração.

Para mitigar esse risco, relés modernos utilizam técnicas de detecção específicas, como a análise da componente harmônica da corrente diferencial, especialmente a segunda harmônica, cuja presença é característica da corrente de magnetização (MAMEDE, 2017), também é possível proteger o sistema estabelecendo a corrente de *Inrush* e ajustando o dial da curva de proteção de forma que o valor da proteção instantânea (função 50) acione a proteção do sistema somente para valores de corrente e tempo superiores a corrente de *Inrush* por um período de 100 ms. Dessa forma, evita-se o *trip* (atuação) indevido do sistema de proteção durante a energização do transformador. Para transformadores de potência superior a 2.000 kVA, a corrente de magnetização é, aproximadamente, 10 vezes o valor da corrente nominal do transformador, portanto, para o tempo de duração de 100 ms.

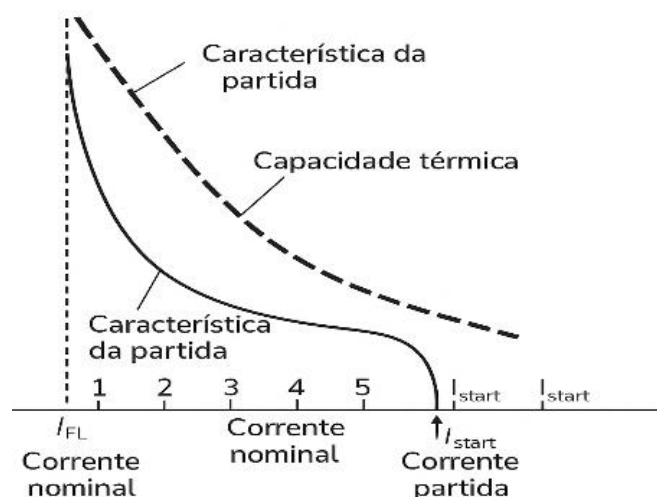
2.3 PROTEÇÃO DE MOTORES

Os motores de indução apresentam uma corrente de partida muito elevada, geralmente entre 6 e 8 vezes a corrente nominal em regime, quando energizados diretamente na linha. Essa corrente de partida pode se assemelhar à corrente de falta, o que dificulta a distinção entre uma sobrecorrente causada por falha e aquela decorrente do arranque do motor.

Para garantir uma proteção eficaz, o relé de sobrecorrente deve ser ajustado para discriminar entre esses dois fenômenos, evitando disparos indevidos durante a partida do motor. A coordenação entre a característica da corrente de partida e a curva do relé de proteção é fundamental, de modo que o relé opere apenas quando a corrente ultrapassar a capacidade térmica do motor, garantindo sua proteção contra sobrecargas reais.

Na Figura 3 ilustra-se essa relação, em que a característica do relé deve situar-se acima da curva da corrente de partida, mas abaixo da curva da capacidade térmica do motor. Assim, o relé não atua durante a fase de partida, mas responde corretamente quando a corrente ultrapassa o limite térmico admissível. Essa coordenação evita falhas de proteção e garante a segurança operacional do motor, preservando sua integridade e prolongando sua vida útil.

Figura 3. Características de partida e térmicas do motor de indução.



Fonte: Adaptado de (PAITHANKAR, Fundamentals of Power System Protection).

Neste trabalho levou-se em consideração que os motores são a principal carga da subestação, portanto deve-se entender bem estes parâmetros para assegurar que o projeto atenda as particularidades da unidade, sem atuações indevidas durante o funcionamento, em especial na partida dos motores.

3 MÉTODOS E RESULTADOS

Este trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, cuja abordagem qualitativa possui objetivo descritivo e explicativo, desenvolvida por meio de um estudo de caso, a escolha por essa metodologia se justifica na realização de uma minuciosa análise técnica do sistema elétrico de proteção existente e propõe implementações já executadas na unidade operacional.

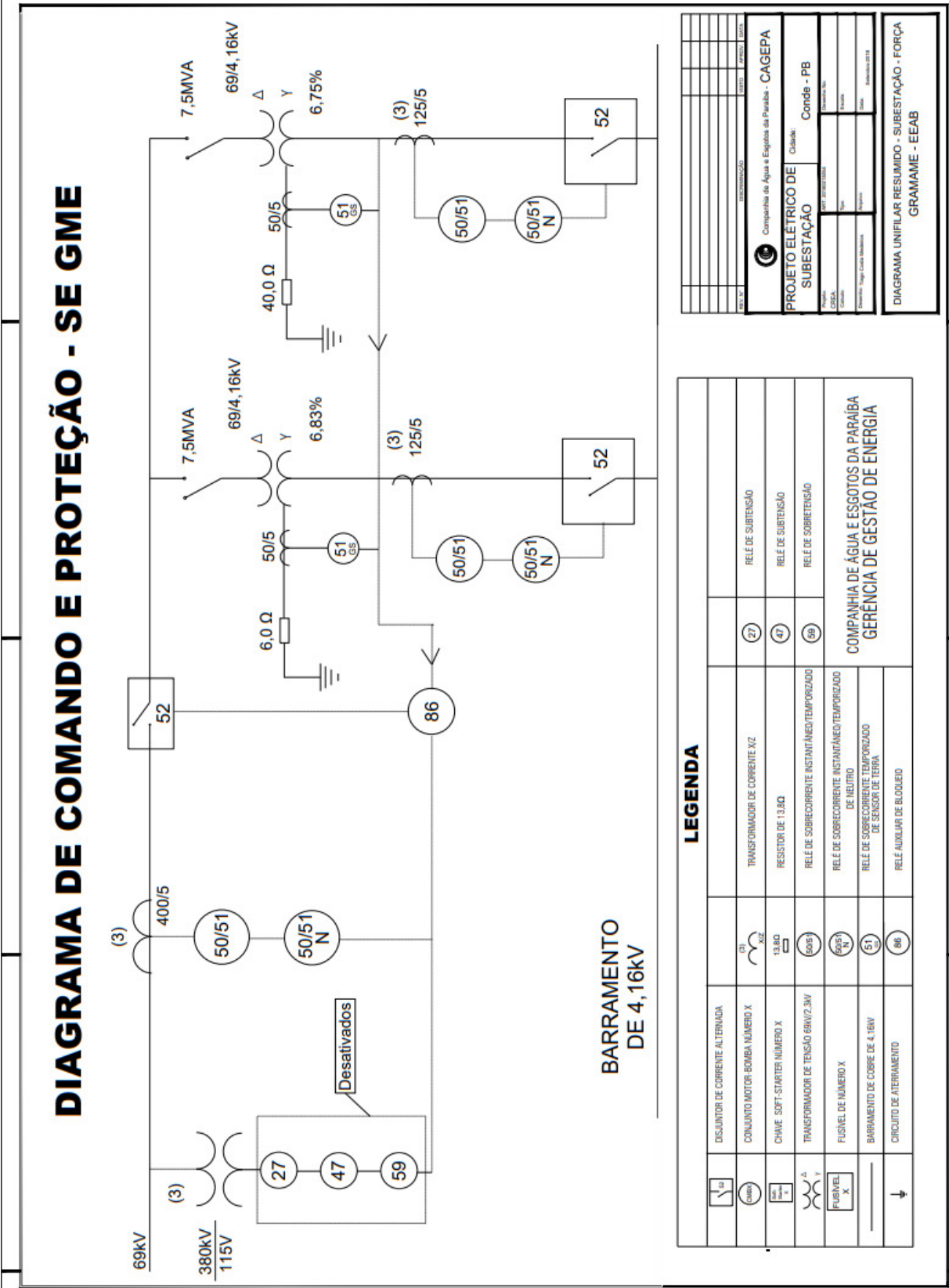
O estudo busca descrever as características do sistema de proteção existente, avaliar seu desempenho operacional e explicar os critérios que nortearam sua atualização. A partir da observação direta e da documentação técnica do projeto executado, é possível compreender os benefícios da modernização do sistema de proteção, assim como os impactos da melhoria na continuidade e confiabilidade do fornecimento de energia elétrica essencial à operação da unidade de captação.

Trata-se de uma pesquisa aplicada, de natureza descritiva e explicativa, estruturada como um estudo de caso técnico-operacional. A escolha do estudo de caso se justifica pela análise de um sistema de proteção elétrica real, já implementado, inserido em um contexto técnico-operacional específico e de alta criticidade: o fornecimento de energia elétrica para uma unidade de captação de água.

O presente estudo busca descrever as características do sistema de proteção existente, avaliar seu desempenho operacional e explicar os critérios que nortearam sua atualização.

A subestação em estudo é responsável por alimentar os sistemas eletromecânicos da unidade de captação do sistema Gramame. Trata-se de uma subestação ao tempo, composta por: um ramal de alimentação em 69 kV, protegido a montante pelo sistema de proteção da concessionária; Transformadores de potencial e corrente para medição; Transformadores de potencial e corrente para proteção; um Disjuntor tripolar com capacidade de operação de 1250 A a 72,5 kV e capacidade de interrupção de corrente de 19 kA; Dois transformadores com potência nominal de 7500 kVA que rebaixam o nível de tensão de 69 kV para 4,16 kV, sendo um para operação e outro de redundância em *stand-by*. O diagrama de comando e proteção da subestação em estudo está ilustrado na Figura 4.

Figura 4. Diagrama de Comando e Proteção da Subestação Gramame.



O aumento do número de manutenções corretivas exigidos pelos transformadores de corrente da Subestação Gramame, que apresentavam tecnologia obsoleta e de difícil reparo, além do custo associado as paradas de funcionamento embasaram a substituição destes elementos de proteção, que já se encontravam ao fim de suas vidas úteis. Tal substituição demanda nova aprovação, pela concessionária local, dos ajustes de proteção do sistema em questão, a fim de adequar a atuação dos novos equipamentos aos critérios técnicos atualizados de seletividade exigidos pela concessionária.

Para garantir o atendimento a tais critérios, efetuou-se o recálculo das proteções contra sobrecorrente e curto-circuito, e a respectiva atualização das curvas de atuação dos relés – objeto de estudo deste trabalho.

O procedimento metodológico aplicado foi baseado nas etapas recomendadas por Eliel Celestino (2014), Mamede (2017), conforme descrito nas subseções que seguem.

3.1 CÁLCULO DA CORRENTE NOMINAL

A corrente nominal (I_{nom}) do sistema dever ser calculada considerando, no mínimo, o fator de potência (fp) de referência 0,92. Considerando a natureza prática do estudo adotou-se a Demanda Máxima ($D_{máx}$) registrada na subestação (3300 kW) como critério de obtenção da corrente, ao invés da potência nominal dos transformadores, e a tensão nominal de linha (V_l). Assim, a corrente nominal pode ser calculada aplicando a equação (1):

$$I_{nom} = \frac{D_{máx}}{\sqrt{3} \times fp \times V_l}. \quad (1)$$

Como uma alteração no fator de potência influencia diretamente a corrente nominal do sistema, foi utilizado como parâmetro de ajuste o fator de potência extraído de medições *in loco*. O fator de potência medido foi de 0,81 indutivo. Portanto, a corrente nominal foi calculada como:

$$I_{nom} = \frac{D_{máx}}{\sqrt{3} \times fp \times V_l} \rightarrow I_{nom} = \frac{3300 \text{ kW}}{\sqrt{3} \times 0,81 \times 69 \text{ kV}} \rightarrow I_{nom} = 34,09 \text{ A}.$$

3.2 CÁLCULO DA CORRENTE DE PARTIDA DOS RELÉS DE PROTEÇÃO DE FASE E DE NEUTRO

Para cálculo da corrente de ajuste do relé, ou corrente de *Pickup* (I_{pickup}), foi aplicado como critério de proteção o excedente de 40% da corrente nominal, indicado na equação (2), adaptada ao ajuste mínimo, visando assegurar maior sensibilidade e rapidez na atuação do relé em caso de faltas (KINDERMANN, 2009):

$$1,4 \times I_{nom} \leq I_{pickup\phi} \leq I_{cc\phi} \quad (2)$$

O critério adotado, assegura que a proteção não atuará em casos indesejados, a exemplo da partida direta dos conjuntos motor-bombas, que elevam a corrente nominal na ordem de 5 a 8 vezes, e está em acordo com o que estabelece a NDU-017 (ENERGISA, 2018), em vigor na época do estudo, mas também protegem o sistema em casos de curtos-circuitos monofásicos, que possuem menor grandeza. Assim:

$$I_{pickup\phi} = 1,40 \times I_{nom} \rightarrow 1,40 \times 34,09 \rightarrow I_{pickup\phi} = 47,72 \text{ A.}$$

Para a corrente de partida de neutro ($I_{p-neutro}$), ou corrente de desbalanço, consideramos 19% da corrente nominal de carga do sistema, conforme estabelece a NDU 017. Dessa maneira, temos:

$$I_{p-neutro} = 0,19 \times I_{p-fase} \rightarrow 0,19 \times 47,72 \rightarrow I_{p-neutro} = 9,06 \text{ A.}$$

3.3 ESTIMATIVA DA CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO (INRUSH) DOS TRANSFORMADORES

Para o correto ajuste da proteção, evitando a atuação indevida no momento de energização do transformador, é necessário que a curva de proteção atue em tempo maior que o tempo necessário para o *Inrush*.

Para transformadores de potência superior a 2.000 kVA, a corrente de magnetização é, aproximadamente, 10 vezes o valor da corrente nominal do transformador, para o tempo de duração de **100 ms**. Assim:

$$I_{inrush(7,5 \text{ MVA})} = 10 \times I_{nom-trafo} \rightarrow 10 \times \frac{7500 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \times 69 \text{ kV}} \rightarrow I_{inrush} = 627,55 \text{ A.}$$

3.4 CÁLCULO DO PONTO ANSI

O ponto ANSI é o máximo valor de corrente que um transformador pode suportar durante um período definido de tempo sem danificar. No caso de curto-circuito fase-terra, por exemplo, este valor, para transformador Δ -Y (triângulo-estrela) com neutro solidamente aterrado é de 0,58 vezes o ponto ANSI.

Os transformadores da subestação têm potência nominal de 7500 kVA e possuem impedância (Z%) igual a 6%. Para esse valor de impedância, o tempo máximo que o transformador pode suportar é de 4,0s conforme a norma IEEE/ANSI C57. As correntes ANSI de fase e neutro, foram calculadas como:

- Corrente de Fase

$$ANSI_{fase} = 20 \times I_{nom-trafo} \rightarrow 20 \times \frac{7500kVA}{\sqrt{3} \times 69 kV} \rightarrow ANSI_{fase} = 1345 A.$$

- Corrente de Neutro

$$ANSI_{neutro} = 0,58 \times ANSI_{fase} \rightarrow 0,58 \times 1345 \rightarrow ANSI_{neutro} = 780 A$$

Um resumo dos valores calculados é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Resumo de parâmetros ANSI calculados.

<i>Trafo</i>	<i>Potência</i>	<i>Inom</i>	<i>Zcc(%)</i>	<i>Tempo(s)</i>	<i>Ponto Ansi Fase</i>	<i>Ponto Ansi Neutro</i>
T01	7500	62,75	6	4	1345	780
T02	7500	62,75	6	4	1345	780

Fonte Autoral.

É importante notar que a curva de atuação do relé deverá ficar abaixo do ponto ANSI do transformador de menor potência, tanto para a função de proteção de fase como para a de neutro (ou de terra). Neste caso prático, foi possível fazer com que a curva de atuação do relé ficasse abaixo do ponto ANSI do transformador.

3.5 PARÂMETROS DO TRANSFORMADOR DE CORRENTE

Para especificar a relação de transformação dos transformadores de corrente, foi considerado o maior valor de corrente de falta no ponto de entrega, informado pela concessionária local. Neste caso, a corrente de curto-circuito trifásico, de 5621,7 A:

$$I_{\text{primário TC}} > \frac{I_{cc}}{20} \rightarrow I_{\text{primário TC}} > \frac{5621,7}{20} \rightarrow I_{\text{primário TC}} > 281 \text{ A}$$

Sendo, $I_{\text{secundário TC}} = 5 \text{ A}$ (padrão), adotou-se TCs com relação de 400:5, pois não haviam TCs com relação 300:5. Portanto, a relação de transformação de corrente no primário é igual a 80 vezes a corrente do secundário, ou seja $R_{TC} = 80$. Consequentemente:

- Corrente máxima suportável:

$$I_{\text{max TC}} = 75 \times I_{\text{primário TC}} \rightarrow I_{\text{max TC}} = 25 \text{ kA}$$

- Corrente de saturação:

$$I_{\text{sat TC}} = 20 \times I_{\text{primário TC}} \rightarrow I_{\text{sat TC}} = 8,0 \text{ kA}$$

3.6 ELEMENTOS DA PROTEÇÃO EM ALTA TENSÃO

A subestação Gramame possui um disjuntor de alta tensão com um relé digital modelo URPE 6104. As características principais dos elementos de proteção no lado de alta tensão estão resumidas na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros dos elementos de proteção de alta tensão.

Dispositivo de disjunção	Disjuntor PVO de Alta Tensão
Quantidade	01 (um)
Tensão Nominal	72,5 kV
Corrente Nominal	1250 A
Frequência Nominal	60 Hz
Capacidade de Interrupção	19.000 A
Fabricação	Sprecher Schuh
Unidade de Controle	URPE 6104
Funções de proteção	50, 51, 50N, 51N
Fabricação	Pextron Controles Eletrônicos

Como indicado na Tabela 2, as funções do relé de proteção, são:

- **Função 50:** Proteção de sobrecorrente instantânea de fase e neutro;
- **Função 51:** Proteção de sobrecorrente temporizada de fase e neutro;
- **Função 50 (instantânea):** a corrente instantânea deverá ser o menor valor para que não provoque atuação indevida durante a energização dos transformadores; assim este valor deverá ser aproximadamente 5% do valor da corrente de magnetização de todos os transformadores.
- **Função 51 (temporizada):** o tipo de curva deverá ser extremamente inversa (EI), de forma a eliminar a falta o mais rápido possível.

3.7 PARAMETRIZAÇÃO DAS CURVAS DE ATUAÇÃO

A parametrização é necessária para realizar o ajuste das funções de proteção dos relés, garantindo que a atuação das curvas (temporizadas e instantâneas) esteja abaixo do ponto ANSI e acima da corrente de magnetização, conforme exigência técnica.

Segundo Kindermann (2009), “a definição da curva e dos ajustes de tempo e corrente deve respeitar os limites térmicos do equipamento, garantindo que a atuação da proteção ocorra antes do dano, mas depois de possíveis transitórios normais do sistema”.

Para dimensionamento apropriado das proteções as correntes de curto-circuito estimadas, fornecidas pela concessionária, foram as listadas na Tabela 3.

Tabela 3. Correntes de Curto-circuito no ponto de Conexão com a Concessionária

Correntes de Curto-Circuito		
Trifásico	Bifásico	Fase Terra
5621,7 A	4868,5 A	3030,9 A

Fonte: Autoria própria com dados fornecidos pela Concessionária

O relé da subestação, URPE 6104, foi configurado com as funções 50/51 e 50N/51N. Os ajustes seguiram os critérios de seletividade e coordenação com o sistema da concessionária, utilizando curvas Extremamente Inversas (EI) para fase e Normalmente Inversas (NI) para neutro, como indicado na Tabela 4.

Os valores finais de ajuste foram obtidos com apoio de planilhas técnicas e verificação por meio de diagramas Tempo *versus* Corrente fornecidos pelos fabricantes.

Tabela 4. Quadro-Resumo dos parâmetros de ajuste do Relé

Ajuste de Fase		Ajuste de Neutro	
I partida	47,81 A	I partida	9,06 A
Curva	EI	Curva	NI
Dial de tempo	0,15 s	Dial de tempo	0,15 s
I instantânea	690,60 A	I instantânea	131,2 A
TC	400/5	TC	400/5

Fonte: Autoria própria

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos com a aplicação do estudo permitiram definir e implementar os ajustes de proteção adequados ao sistema da subestação da unidade de captação Gramame, garantindo segurança, seletividade e confiabilidade na operação.

A corrente nominal dos transformadores foi estimada em 34,09 A conforme equação (1). Com base nesse valor, foram definidas as correntes de partida dos relés em 47,81 A (fase) e 9,06 A (neutro), aplicando as margens previstas. A corrente de magnetização, estimada em 10 vezes a corrente nominal do Transformador (627,5 A), foi utilizada como referência para que a proteção instantânea (função 50) não atuasse indevidamente.

A função 51 foi ajustada com curva Extremamente Inversa (EI) e dial 0,15 s, enquanto a função 51N foi configurada com curva Normal Inversa (NI), também com dial 0,15 s. O valor de atuação instantânea foi definido em 690,60 A para fase e 131,2 A para neutro, respeitando o intervalo entre corrente de magnetização e corrente de curto-circuito.

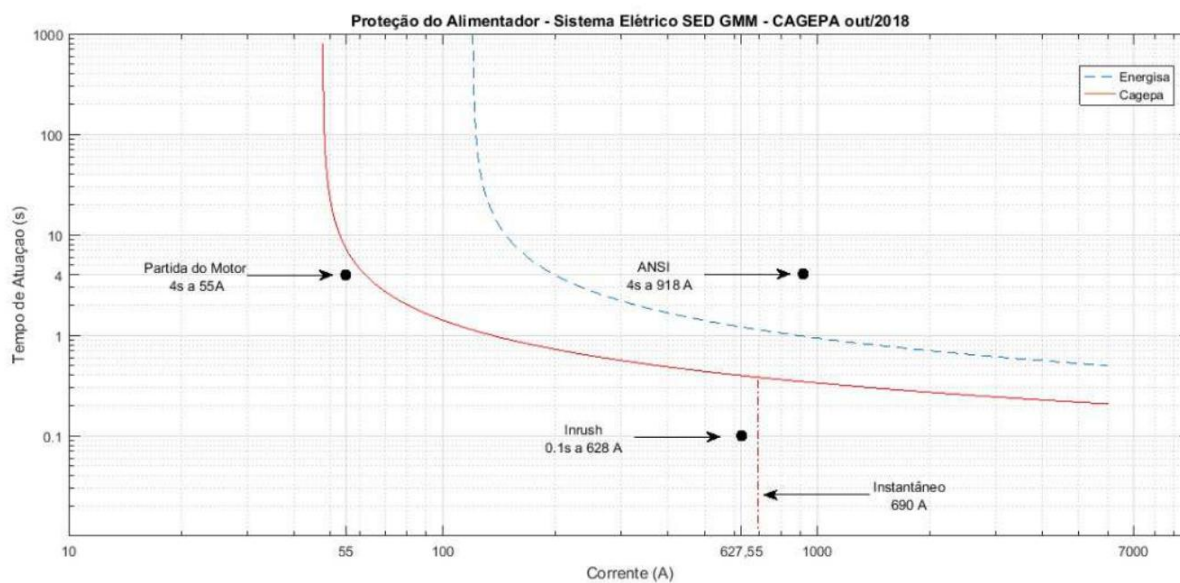
O ponto ANSI dos transformadores foi calculado como 1345 A para fase e 780 A para neutro, com base em sua impedância (6%) e tempo de atuação de 4 s. De acordo com Kindermann (2009, p. 268), “o ponto ANSI representa a corrente máxima que o transformador pode suportar durante um curto-circuito sem sofrer danos térmicos, devendo a curva do relé manter-se abaixo desse valor.”

A coordenação com o sistema da concessionária Energisa foi verificada considerando os valores de curto-circuito trifásico (5621,7 A), bifásico (4868,5 A) e fase-terra (3030,9 A) no ponto de entrega.

Por fim, os Transformadores de Corrente (TCs) utilizados (400/5 A) demonstraram capacidade adequada de saturação (até 5,62 kA), assegurando que os sinais secundários utilizados para as proteções não seriam distorcidos, mesmo sob correntes de falta elevadas.

A atuação final dos relés foi validada por meio da sobreposição das curvas de atuação com os diagramas tempo $\times$ corrente e os limites técnicos do sistema, como ilustrado na Figura 5. As curvas obtidas demonstraram que o sistema opera com proteção eficaz, sem riscos de atuação indevida durante a energização e com garantia de desligamento seguro durante faltas reais.

Figura 5. Coordenograma de proteção da SE



Fonte: Autoral.

Verifica-se no diagrama tempo $\times$ corrente do relé selecionado (Figura 5), que a corrente de magnetização da disjunção está abaixo da curva adotada que cujo $dt = 0,15$ segundo, assim não haverá trip do disjuntor quando da energização da subestação. O ponto ANSI dos transformadores está acima da curva adotada cujo $dt = 0,15$ segundo, assim a proteção do mesmo está assegurada. A corrente de curto-circuito máxima no ponto de entrega, não ocasionará a saturação dos TCs especificados. Com o dial ajustado para 0,15 s para a proteção de fase, o relé não deverá atuar durante a partida dos motores.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo analisar e ajustar o sistema de proteção da subestação elétrica da unidade de captação Gramame, com foco na coordenação e seletividade das proteções diante da substituição dos transformadores de corrente e potencial. A partir da adoção de uma metodologia baseada em estudo de caso técnico-operacional, foi possível identificar, calcular e redefinir parâmetros fundamentais para a confiabilidade e segurança do sistema elétrico que alimenta um processo essencial à população: o tratamento e fornecimento de água.

Com base em dados reais da instalação e nos valores de curto-circuito fornecidos pela concessionária, os ajustes dos relés de proteção foram realizados de forma criteriosa, respeitando as margens de segurança e os limites térmicos dos transformadores. A análise detalhada das correntes nominais, das correntes de partida e das correntes de magnetização permitiu estabelecer ajustes seletivos, evitando atuações indevidas e garantindo resposta eficiente em situações de falha.

O estudo demonstrou que as funções temporizadas e instantâneas dos relés (50/51 e 50N/51N) foram corretamente configuradas, assegurando que os dispositivos de proteção atuem dentro dos limites de coordenação com o sistema da concessionária e abaixo do ponto ANSI dos transformadores. A verificação das curvas tempo $\times$ corrente, aliada à capacidade dos TCs utilizados, confirmou a eficácia dos ajustes adotados.

Após o período de planejamento e execução da solução de readequação da proteção que estava desatualizada a mais de 10 anos, houve um acidente, durante a execução de uma melhoria no sistema, a implementação de um banco de capacitores para correção do fator de potência e compensação do excesso de reativos indutivos gerados pela alta potência dos motores do sistema, uma falha de projeto ocasionou a geração de harmônicos devido a ressonância do sistema, elevando as correntes e ocasionando a ruptura dos elementos fusíveis no cubículo de interconexão do banco com o barramento secundário na subestação. Essa falha teve consequências catastróficas para a unidade, como observado nas figuras 6 e 7, o rompimento dos fusíveis induziu a ocorrência de uma falta trifásica de magnitude suficiente para ativar as proteções da subestação e da concessionária a 69 kV de forma instantânea, que como visto anteriormente é o nível mais elevado de corrente que o sistema pode suportar sem prejuízo dos demais equipamentos.

A atuação preventiva e tecnicamente fundamentada sobre os parâmetros de proteção contribui para a redução de riscos operacionais, minimização do tempo de

indisponibilidade do sistema e aumento da segurança dos equipamentos e processos da unidade de captação. O presente trabalho proporcionou a segurança hídrica de centenas de milhares de pessoas, através da aplicação de técnicas aprendidas ao longo dessa graduação. Em sistemas críticos como os de abastecimento de água, garantir a continuidade e a estabilidade elétrica é condição indispensável à saúde pública e ao bem-estar coletivo.

Recomenda-se, para estudos futuros, a integração dos sistemas de proteção com ferramentas de monitoramento remoto e inteligência operacional, bem como a realização de simulações mais abrangentes em condições diversas de carga e contingência, visando aumentar ainda mais a resiliência do sistema frente a diferentes cenários operacionais.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

MAMEDE FILHO, João; MAMEDE, Daniel Ribeiro. Proteção de sistemas elétricos de potência. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

KINDERMANN, M. W. Proteção de sistemas elétricos de potência. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

YIN, R. K. Estudo de caso: planejamento e métodos. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

Eli SILVA, Eliel Celestino da. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência: guia prático de ajustes. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2014

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus João Pessoa - Código INEP: 25096850
	Av. Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe, CEP 58015-435, João Pessoa (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0002-56 - Telefone: (83) 3612.1200

Documento Digitalizado Restrito

TCC com Ficha - Tiago Costa Medeiros

Assunto:	TCC com Ficha - Tiago Costa Medeiros
Assinado por:	Tiago Medeiros
Tipo do Documento:	Anexo
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Restrito
Hipótese Legal:	Informação Pessoal (Art. 31 da Lei no 12.527/2011)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Tiago Costa Medeiros, ALUNO (20141610390) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - JOÃO PESSOA, em 13/02/2026 22:31:13.

Este documento foi armazenado no SUAP em 13/02/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1768378
Código de Autenticação: 984fcffd3b

